Nouveau Cours

de

Physique Élémentaire

II

A LA MÊME LIBRAIRIE

Notions élémentaires de Physique, rédigées conformément aux programmes de 1912, par MM. J. Faivre-Dupaigre, inspecteur général de l'Instruction publique et E. Carimey, professeur au lycée Saint-Louis. Deux volumes in-16 :

I. Classe de quatrième B (3ᵉ édition) Un vol. in-16, avec 150 figures, cartonné toile souple . . . . 2 fr.

II. Classe de troisième B (2ᵉ édition) Un vol. in-16, avec 184 figures, cartonné toile souple . . . . 2 fr. 50

Nouveau Cours de Physique élémentaire, *à l'usage des classes de Sciences*, publié sous la direction de É. Fernet, inspecteur général honoraire de l'Instruction publique, par MM. J. Faivre-Dupaigre, inspecteur général de l'Instruction publique et E. Carimey, professeur au lycée Saint-Louis. Rédaction nouvelle conforme aux programmes de 1912

I Classes de seconde C et D (4ᵉ édition). Un vol. in-16, avec 258 figures et 125 exercices, cart. toile souple . . . . . 3 fr.

II Classes de première C et D (4ᵉ édition) Un vol. in-16, avec 394 figures et 158 exercices, cart. toile souple . . . . . . 4 fr

III. Classes de mathématiques A et B (3ᵉ édition) Un vol in-16 avec 342 figures et 104 exercices, cart. toile souple . . . . . 4 fr.

Traité élémentaire de Physique, rédigé conformément aux programmes de 1912, *à l'usage des classes de Philosophie A et B et des élèves de l'Enseignement secondaire des jeunes filles*, par MM. J. Faivre-Dupaigre et E. Carimey (2ᵉ édition). Un fort vol. in-16 avec 690 figures, cartonné toile souple . . . . 6 fr. 50

Cours de Physique pour la classe de Mathématiques spéciales, par E Fernet et J. Faivre-Dupaigre. 5ᵉ édition, entièrement refondue par MM. J Faivre Dupaigre et J. Lamirand, inspecteur de l'Académie de Paris, ancien professeur au lycée Saint-Louis. Un fort volume grand in-8°, avec 951 figures, broché. . 20 fr

---

Nouveau Cours de Chimie Élémentaire, conforme aux programmes de 1912, par MM G. Wallerant, professeur au Collège de France et J Lamirand, inspecteur de l'Académie de Paris, ancien professeur au lycée Saint-Louis

Classes de Philosophie A, B. Un vol. in-16 avec 299 figures et 80 exercices, cart toile souple . . . . . . 3 fr 50

Classes de seconde C D Un vol. in 16, avec 193 figures et 60 exercices, cart toile souple . . . . 2 fr. 50

Classes de Première C, D. Un vol in-16 avec 207 figures et 65 exercices, cart. toile souple. . . . . . 3 fr.

Classes de Mathématiques A, B (*Sous presse*)

72410 — Imprimerie Lahure, 9, rue de Fleurus, à Paris

Nouveau Cours

de

Physique Élémentaire

PUBLIÉ SOUS LA DIRECTION DE

É. FERNET

INSPECTEUR GÉNÉRAL HONORAIRE DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE

PAR MM

J. FAIVRE-DUPAIGRE
INSPECTEUR GÉNÉRAL DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE
ANCIEN PROFESSEUR AU LYCÉE SAINT-LOUIS

E. CARIMEY
PROFESSEUR DE PHYSIQUE
AU LYCÉE SAINT-LOUIS

DEUXIÈME PARTIE

Classes de Première C et D

QUATRIÈME ÉDITION

Rédigée conformément au programme de 1912

PARIS
MASSON ET Cie, ÉDITEURS
120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1915

Tous droits de traduction et de reproduction réservés pour tous pays

LISTE DES ABRÉVIATIONS

EMPLOYÉES DANS LE PRÉSENT OUVRAGE

LONGUEURS

km .	kilomètre = 10^3 m
m . .	mètre.
dm	décimètre = 10^{-1} m.
cm	centimètre = 10^{-2} m.
mm.	millimètre = 10^{-3} m.
μ. .	micron = 10^{-3} mm = 10^{-6} m

SURFACES

m²	mètre carré
dm² .	décimètre carré = 10^{-2} m²
cm²	centimètre carré = 10^{-4} m².
mm²	millimètre carré = 10^{-6} m²

VOLUMES

m³ .	mètre cube.
dm³	décimètre cube = 10^{-3} m³
cm³	centimètre cube = 10^{-6} m³
mm³	millimètre cube = 10^{-9} m³

CAPACITÉS

l .	litre = 1 dm³.
dl. .	décilitre = 10^{-1} l.
cl. .	centilitre = 10^{-2} l
ml	millilitre = 10^{-3} l = 1 cm³

POIDS OU MASSES

t	tonne = 10^3 kg = 10^6 g
kg .	kilogramme = 10^3 g.
g .	gramme
dg	décigramme = 10^{-1} g.
cg .	centigramme = 10^{-2} g.
mg. .	milligramme = 10^{-3} g.

TEMPS

j. .	jour = 86400 s.
h .	heure = 3600 s
min .	minute = 60 s.
s	seconde.

TRAVAIL

kgm	kilogrammètre.

PUISSANCE

ch-v .	cheval-vapeur = 75 kgm par s
w	watt = 1 joule par s
kw	kilowatt = 10^3 watts.

EXPRESSIONS NUMÉRIQUES

41,527 m signifie 41 mètres 527 millimètres.

3,27 g signifie 3 grammes 27 centigrammes

$10^2 = 100$

$10^3 = 1\,000$

$10^4 = 10\,000$, etc

$10^{-1} = \frac{1}{10} = 1$ dixième.

$10^{-2} = \frac{1}{10^2} = 1$ centième.

$10^{-3} = \frac{1}{10^3} = 1$ millième; etc.

NOTA. — Les abréviations relatives aux longueurs, surfaces, volumes, capacités, poids et masses, sont extraites du tableau des signes abréviatifs *officiels* du système métrique, fixés par le décret du 28 juillet 1903, et rendus *obligatoires* dans l'enseignement par la circulaire du 25 avril 1906

TABLE DES MATIÈRES

LIVRE TROISIÈME

OPTIQUE

Chap. I. — Propagation de la lumière. — Photométrie.

I. — Propagation de la lumière.

II. — Mesure de la vitesse de la lumière.

III. — Photométrie.

Chap. II. — Réflexion de la lumière.

I. — Miroirs plans. — Lois de la réflexion.

II. — Miroirs sphériques : étude expérimentale.

III. — Miroirs sphériques : étude théorique. — Formules des miroirs sphériques.

Chap. III. — Réfraction de la lumière.

I. — Phénomènes fondamentaux.

II. — INSTRUMENTS D'OPTIQUE.

CHAP. VI. — **Photographie.**

LIVRE QUATRIÈME

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

CHAP. I. — Électricité statique.

I. — PHÉNOMÈNES FONDAMENTAUX.

VI. — Effets chimiques du courant électrique. — Électrolyse.

VII. — Générateurs électriques consommant de l'énergie chimique. Piles hydro-électriques.

VIII. — Accumulateurs.

CHAP. III. — Magnétisme.

I. — PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX DU MAGNÉTISME.

II. — NOTION DE CHAMP MAGNÉTIQUE. — CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE.

CHAP. IV. — Électromagnétisme.

I. — CHAMPS MAGNÉTIQUES PRODUITS PAR LES COURANTS. ACTION D'UN COURANT SUR UN AIMANT.

II. — GALVANOMÈTRE A AIMANT MOBILE.

III. — ACTION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE SUR UN COURANT. — GALVANOMÈTRE A CADRE MOBILE.

CHAP. V. — Aimantation par les champs magnétiques.

I. — CHAMP MAGNÉTIQUE A L'INTÉRIEUR D'UN AIMANT.

II. — AIMANTATION DU FER ET DE L'ACIER

CHAP. VI. — Induction électromagnétique.

FORCE ÉLECTROMOTRICE D'INDUCTION. — COURANTS INDUITS.

CHAP. VII. — Applications de l'électricité.

I. — APPLICATIONS DES ÉLECTRO-AIMANTS. — SONNERIES ÉLECTRIQUES. — TÉLÉGRAPHIE ÉLECTRIQUE.

II. — TÉLÉPHONE ET MICROPHONE.

III — APPLICATION DE LA LOI DE L'ACTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE ET DE LA LOI DE L'INDUCTION. — MACHINE DE GRAMME.

IV. — APPLICATIONS DE LA LOI DE JOULE. — ÉCLAIRAGE ET CHAUFFAGE ÉLECTRIQUES

V. — APPLICATIONS DE L'ÉLECTROLYSE.

CHAP. VIII. — **Électricité atmosphérique.**

CHAP. IX. — **Magnétisme terrestre.**

I. — MESURE DE LA DÉCLINAISON ET DE L'INCLINAISON.

II. — ÉTAT MAGNÉTIQUE DU GLOBE TERRESTRE.

Problèmes.

OPTIQUE.

ÉLECTRICITÉ.

Nota. — Le programme des Classes de Première C et D, publié le 4 mai 1912, a modifié d'une façon appréciable l'ancien programme de 1902. Dans la présente édition il a été tenu compte de ces modifications.

Quelques matières, obligatoirement supprimées du programme à partir du 1er octobre 1913, pouvant néanmoins intéresser le lecteur, ont été conservées; mais les paragraphes qui s'y rapportent sont imprimés en *petits caractères*, et peuvent être laissés de côté.

Nouveau Cours

DE

Physique élémentaire

CLASSES DE PREMIÈRE C ET D

LIVRE TROISIÈME

OPTIQUE

CHAPITRE PREMIER

PROPAGATION DE LA LUMIÈRE
PHOTOMÉTRIE

I. — Propagation de la lumière.

1. ***Production de la lumière. — Sources lumineuses et corps éclairés.*** — L'Optique a pour objet l'étude des phénomènes lumineux.

On rapporte ces phénomenes à une cause appelée *lumière*, qui émane de certaines sources naturelles, comme le Soleil ou les étoiles. — Pour produire artificiellement de la lumière, un procédé consiste à élever suffisamment la température d'un corps quelconque. Si, par exemple, on prend un fil de platine et que, dans l'obscurité, on le chauffe progressivement en y faisant passer un courant électrique d'intensité croissante, l'expérience montre que le fil, d'abord invisible, commence à paraître rouge sombre vers 500°, devient rouge cerise vers 800°, blanc vers 1300°, et, enfin, blanc éblouissant au

delà de 1500°. Le platine, dans ces conditions, est dit *incandescent*. — Les liquides peuvent, de même, être portés à l'incandescence ; tel est, par exemple, le cas d'un jet de fonte en fusion, sortant d'un haut-fourneau. — Les gaz, enfin, peuvent également devenir incandescents en particulier, la flamme du gaz de l'éclairage est constituée par un gaz enflammé, tenant en suspension des parcelles de charbon qui sont portées à l'incandescence par la chaleur dégagée dans la combustion.

Quant aux corps non lumineux par eux-mêmes, ils deviennent visibles lorsqu'on les éclaire au moyen d'une source lumineuse quelconque, dont ils renvoient la lumière jusqu'à notre œil. C'est ainsi que nous voyons les corps qui nous entourent, à la faveur de la lumière du jour ou de nos foyers lumineux.

Il n'y a d'ailleurs aucune distinction essentielle à établir, au point de vue des propriétés que nous aurons à étudier, entre les *sources lumineuses* proprement dites et les *corps éclairés*. Nous pouvons donc les réunir sous le nom général de *corps lumineux*. — Si les dimensions du corps lumineux sont infiniment petites, on a ce qu'on appelle un *point lumineux* ; un corps lumineux est une réunion de points lumineux.

2. ***Transmission de la lumière. — Corps transparents, corps translucides et corps opaques.*** — Au point de vue de la *transmission* de la lumière, les corps peuvent se ranger en trois groupes : les corps transparents, les corps translucides et les corps opaques.

Les corps *transparents*, interposés entre l'œil et un objet lumineux, laissent subsister la perception complète de cet objet ; tels sont l'air, l'eau, le verre.

Les corps *translucides*, dans les mêmes conditions, diffusent la lumière en tous sens, sans permettre la perception de la forme de l'objet lumineux lui-même ; exemples : le papier huilé, la porcelaine mince, le verre dépoli.

Enfin, les corps *opaques* sont ceux qui, comme le bois, la pierre, les métaux, interceptent complètement toute lumière.

Il est à noter, d'ailleurs, que la transparence et l'opacité ne sont que des propriétés relatives, qui dépendent de l'*épaisseur* traversée, et de la *couleur* de la lumière. Ainsi, l'or peut être réduit en feuilles assez minces pour devenir transparent et laisser filtrer une lumière verte, tandis que l'eau, prise *sous une grande épaisseur* comme la profondeur des mers, finit par absorber toute lumière et devient opaque. — De même, chacun sait que les verres rouges des chambres noires photographiques arrêtent toute lumière autre que la lumière rouge : ces verres sont donc *transparents pour le rouge*, et opaques pour les lumières des autres couleurs.

3. ***Propagation rectiligne de la lumière.*** — Si l'on place à une

certaine distance l'un de l'autre deux écrans opaques, percés chacun d'une petite ouverture C et C′ (*fig.* 1), et qu'avec l'œil placé en O, en arrière de C′, on cherche à voir la flamme A d'une bougie, placée en avant de C, l'expérience montre que la lumière ne devient perceptible que si la droite CC′, déterminée par les deux petits trous C et C′, rencontre à la fois l'œil et la flamme.

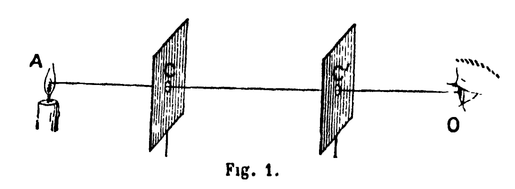


Fig. 1.

Or, dans ces limites, l'air est un milieu homogène. Donc, *dans un même milieu transparent et homogène*, comme l'eau, l'air dans une petite étendue, *la lumière se propage en ligne droite*, *d'un point lumineux à tout point du milieu.*

C'est la loi de la propagation rectiligne de la lumière.

4. Rayons lumineux. — On donne le nom de *rayons lumineux* aux directions le long desquelles la lumière se propage dans un certain milieu. Lorsque le milieu est homogène, et c'est le seul cas que nous étudierons, les rayons lumineux sont rectilignes. Ces rayons partent des divers points d'une source lumineuse dans toutes les directions, et portent la lumière dans tout l'espace environnant. — Il faut bien remarquer, du reste, qu'un rayon lumineux isolé est une direction géométrique, c'est-à-dire une abstraction de notre esprit: on n'a jamais obtenu, et l'on ne peut pas obtenir, un rayon lumineux unique. Dans toutes les expériences qui servent de base à la loi de la propagation rectiligne, on opère toujours en réalité sur des *faisceaux* lumineux, très étroits il est vrai, mais qui renferment encore une infinité de rayons.

Les faisceaux lumineux les plus simples sont les faisceaux *coniques*, c'est-à-dire ceux dont les rayons viendraient passer tous par un même point. — Un faisceau conique est dit *convergent* ou *divergent*, selon que la lumière chemine vers le sommet S du cône

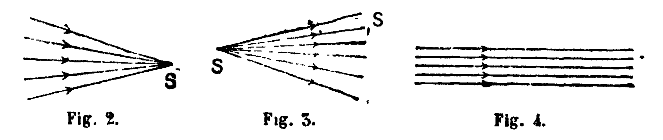


Fig. 2. Fig. 3. Fig. 4.

(*fig.* 2), ou qu'elle s'en éloigne (*fig.* 3). — Un cas particulièrement intéressant est celui où le sommet du cône s'éloigne indéfiniment; les rayons sont alors parallèles, et le faisceau est dit *cylindrique* ou *parallèle* (*fig.* 4).

La loi de la propagation rectiligne fournit la solution du problème des ombres, et du problème de la chambre noire. L'accord des résultats de la théorie avec l'expérience pourra être considéré comme une vérification de la loi de la propagation rectiligne.

5. ***Ombre et pénombre.*** — Lorsque la lumière émise par une source vient à rencontrer un corps opaque, elle est arrêtée, et il y a, sur le corps opaque et derrière lui, toute une région qui se trouve dans l'ombre. La loi de la propagation rectiligne permet de déterminer géométriquement cette région.

Considérons d'abord le cas idéal où le corps lumineux serait réduit à *un seul point* S (*fig.* 5); soit O le corps opaque, de forme

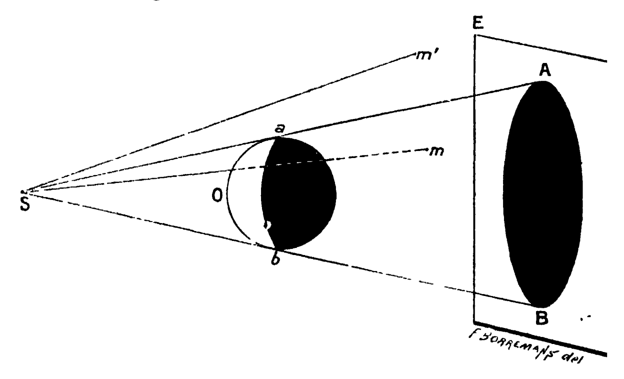


Fig. 5.

supposée sphérique, pour plus de simplicité. — Menons, par le point lumineux S, une droite Sa tangente au corps opaque, et supposons que cette droite se meuve de manière à occuper toutes les positions possibles, en passant toujours par S et restant tangente à la sphère O : elle décrira une surface conique Sab, ayant pour sommet le point S et circonscrite au corps opaque. Si l'on prend un point quelconque m à l'intérieur de cette surface et au delà de O, le rayon émis par S dans la direction Sm sera intercepté par le corps opaque. Au contraire, tout point m', situé à l'extérieur de cette surface, ou dans son intérieur, mais en avant du corps opaque, recevra un rayon lumineux Sm'. — La surface du cône Sab, au delà de sa courbe de contact ab avec le corps opaque, forme donc la limite entre les points qui sont dans l'ombre et ceux qui reçoivent la lumière de la source S : ce cône est, pour cette raison, appelé le *cône d'ombre*. Sur le corps opaque, toute la surface au delà de ab est dans l'ombre; sur un écran blanc E, placé derrière le corps, on obtient une *ombre portée* AB, absolument noire; c'est l'intersection du

cône d'ombre par le plan de l'écran. Les résultats sont évidemment du même genre, quelle que soit la forme du corps opaque.

Considérons maintenant le cas où la source lumineuse a *des dimensions sensibles* : c'est le cas des sources avec lesquelles nous pouvons opérer.

Soit, par exemple, comme corps lumineux, la flamme d'une bougie BC (*fig.* 6) (ou mieux celle d'un bec de gaz), et un corps

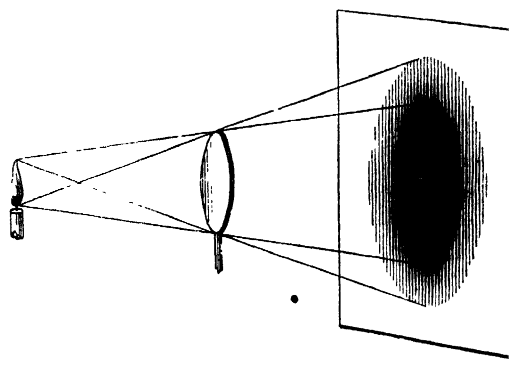


Fig. 6.

opaque PQ. Si l'on trace les cônes d'ombre des points extrêmes B et C de la source, la partie MPQM′ commune à ces cônes, située derrière le corps opaque, est la région d'*ombre pure*. Elle donne naissance, sur un écran blanc E, à une *ombre portée* MM′ complètement noire. Cette région d'ombre pure est déterminée, comme on le voit sur la figure, par la surface réglée MPBCQM′ formée des génératrices des cônes d'ombre qui enveloppent *extérieurement* la source lumineuse et le corps opaque. Quant aux points situés dans les régions MPN et M′QN′ de ces cônes d'ombre, extérieures à l'ombre pure, ils reçoivent évidemment de la lumière, mais d'un nombre de points lumineux d'autant moindre qu'ils sont plus près de l'ombre. Cette région constitue la *pénombre*, limitée d'une part à l'ombre pure, d'autre part à la surface réglée NPCBQN′, formée des génératrices des cônes d'ombre qui enveloppent *intérieurement* le corps lumineux et le corps opaque. La pénombre donne lieu, sur l'écran E, à une *pénombre portée* MNM′N′, qui entoure l'ombre, et se dégrade du noir au blanc, comme le montre, en effet, l'expérience.

Si le corps lumineux et le corps opaque sont tous deux sphériques, les surfaces réglées précédentes deviennent des cônes.

L'ombre pure est alors déterminée par le cône tangent extérieurement à la sphère lumineuse S (*fig.* 7) et à la sphère opaque O.

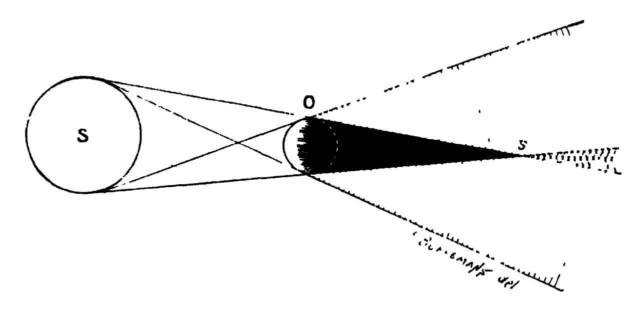


Fig. 7.

Lorsque la première est plus grosse que la seconde, ce cône d'ombre, marqué en noir sur la figure, est limité à son sommet *s*. La pénombre, définie de même par le cône tangent intérieurement aux deux sphères, et marquée par des hachures, est, au contraire, illimitée derrière le corps opaque.

Si l'on coupe par un écran blanc en avant de *s*, on a sur l'écran ombre et pénombre portées; si l'on coupe en arrière de *s*, on n'a plus que de la pénombre.

Pour un œil qui serait situé dans la région de la pénombre constituée par le prolongement des génératrices du cône d'ombre, le corps lumineux apparaîtrait sous la forme d'un *anneau* plus ou moins régulier; il est facile, en effet, de constater que, pour un point de cette région, le corps opaque se projette entièrement sur le corps lumineux Dans toute autre région de la pénombre, le corps lumineux apparaîtrait à l'œil sous la forme d'un *croissant*, parce qu'alors le corps opaque ne se projetterait qu'en partie sur le corps lumineux.

6. ***Chambre noire.*** — Lorsqu'on est placé dans une pièce fermée par des volets, et que l'un des volets MN présente une petite ouverture *mn* (*fig.* 8), on aperçoit, sur un écran blanc PQ placé à une certaine distance de l'ouverture, une reproduction plus ou moins nette, et renversée, des objets extérieurs.

Ce phénomène s'explique encore par la propagation rectiligne de la lumière. — Considérons l'un des points A de l'objet lumineux AB : ce point éclaire les points de l'écran situés dans un cône dont le sommet est A, et dont les arêtes s'appuient sur le contour de l'ouverture; la petite surface a donc une forme *semblable à celle de l'ouverture.* Il en est de même pour chacun des points de l'objet

lumineux AB. — Or, si l'ouverture est suffisamment petite, et si l'objet lumineux est suffisamment éloigné pour que les cônes dont il s'agit soient très aigus, et empiètent peu les uns sur les autres,

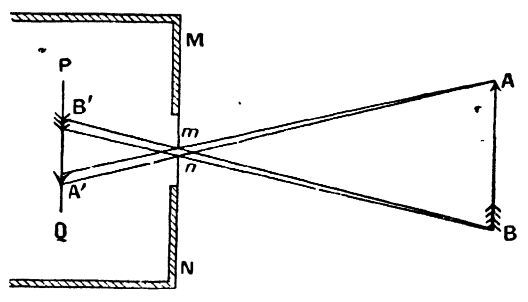


Fig. 8.

l'ensemble des petites surfaces éclairées constitue *une sorte d'image* A'B' *semblable à l'objet*, dans une position *renversée* (*). — Si l'on éloigne progressivement l'écran PQ de l'ouverture, les dimensions de cette image augmentent.

C'est par un phénomène semblable que, dans l'ombre d'un arbre éclairé par le Soleil, les petites ouvertures, que laissent entre elles les feuilles, produisent sur le sol des images du Soleil, dont la forme elliptique est due à ce que les rayons ont généralement une direction oblique par rapport au sol. On obtient des images circulaires, sur une feuille de papier placée perpendiculairement aux rayons solaires. — Enfin, pendant les éclipses partielles, quand le Soleil éclipsé prend la forme d'un croissant lumineux, ces images acquièrent elles-mêmes la forme de petits croissants.

II. — Mesure de la vitesse de la lumière.

7. ***Premiers essais de mesure de la vitesse de la lumière.*** — La lumière se propage avec une vitesse considérable. Les premiers essais de mesure directe de cette vitesse furent tentés, sur des indications de Galilée, par l'*Académie del Cimento* (*Académie de l'expérience*, fondée à Florence, en 1657, par les successeurs de

(*) On verra plus loin que ce n'est pas là une véritable *image*, dans le sens qui sera défini à propos des miroirs ou des lentilles. — Si l'ouverture a un diamètre un peu considérable, chaque point de l'objet éclaire, sur l'écran, une surface de dimensions sensibles; toutes ces surfaces empiétant alors beaucoup les unes sur les autres, on n'a plus qu'un éclairement à peu près uniforme.

Galilée) (*). Mais ces expériences ne donnèrent aucun résultat : les procédés employés pour mesurer le temps étaient trop peu précis. — Plus tard, en 1672, l'astronome danois Rœmer (1644-1710) parvint à déterminer cette vitesse au moyen de l'observation des éclipses du premier satellite de Jupiter ; il lui assigna une valeur de 77 000 lieues ou 308 000 kilomètres par seconde.

8. ***Principe de la mesure de la vitesse de la lumière par la méthode de la roue dentée de Fizeau.*** — Fizeau (**), reprenant l'idée des Académiciens de Florence, imagina une méthode qui permet de mesurer la vitesse de la lumière, en opérant sur des distances de quelques kilomètres seulement. Les expériences de Fizeau, publiées en 1849, ont été effectuées entre Montmartre et Suresnes : la distance des deux stations était de 8633 mètres. Voici quelle était la *disposition de l'appareil.*

A Suresnes était disposé un point lumineux intense S (*fig.* 9), qui, grâce à une glace sans tain M, renvoyait un faisceau de lumière

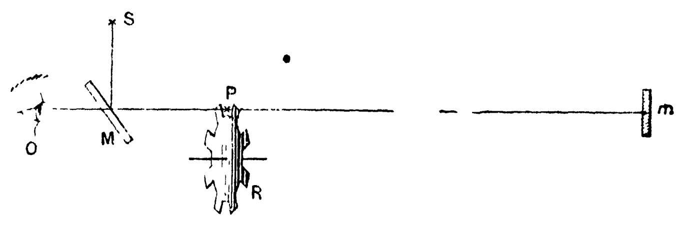


Fig 9.

horizontalement, à travers l'intervalle P laissé libre entre les dents d'une roue R. A Montmartre était placé un miroir *m*, qui recevait perpendiculairement le faisceau, et le renvoyait sur lui-même à l'œil de l'observateur placé en O derrière la lame M. De cette façon, l'œil ne pouvait recevoir que la lumière de retour, passant par le point P. La roue R étant mise en mouvement par un mécanisme d'horlogerie, la lumière ne pouvait franchir le point P que pendant le temps où la roue présentait, en ce point, l'espace *creux* compris

(*) On avait placé, à une distance d'environ un mille, deux observateurs munis chacun d'une lampe. A un moment déterminé, le premier observateur devait démasquer sa lampe ; le second devait démasquer la sienne lorsqu'il apercevrait la lumière du premier. L'intervalle qui se serait écoulé entre le moment où le premier observateur aurait découvert sa lampe, et celui où il aurait aperçu la lampe du second observateur, aurait donc été le temps employé par la lumière pour franchir le double de la distance qui séparait les deux observateurs.

(**) Fizeau, physicien français (1819-1896), qui a laissé d'importants travaux sur l'Optique.

entre deux dents : le passage de la lumière était intercepté pendant tout le temps où la roue présentait, en ce même point, le *plein* de l'une de ses dents.

Il est facile, dès lors, de comprendre le *principe de la méthode*. — La roue ayant reçu une certaine vitesse de rotation, un rayon venant de la source franchit le point P au moment où se présente un *creux* de la roue dentée. Si, pendant le temps que met ensuite ce rayon pour se propager de Suresnes à Montmartre et revenir à Suresnes, le *plein* de la dent suivante est venu prendre exactement la place du creux, ce rayon sera intercepté au retour. Il en sera de même pour tous les autres rayons qui lui auront succédé à travers le même creux, et à travers les creux suivants, car les dimensions des intervalles creux sont égales à celles des parties pleines. Dès lors, l'œil placé en O ne recevra aucune lumière : il y aura *éclipse* complète. — On n'a donc, en commençant l'expérience, qu'à augmenter progressivement la vitesse de rotation. On observe d'abord le point lumineux de retour comme une source *continue*, bien qu'elle ne soit qu'*intermittente*, et cela grâce à la propriété que possède notre rétine de conserver une impression lumineuse pendant environ 1/10 de seconde après qu'elle a cessé de se produire (*). Il suffit donc que les impressions se succèdent à des intervalles moindres que 1/10 de seconde, pour que le point lumineux soit perçu comme une source continue. La vitesse continuant à croître, on observe ensuite un affaiblissement progressif de la lumière ; puis, à un moment donné, l'éclipse devient complète. Or le mécanisme est disposé de manière qu'il permet de connaître le nombre de tours alors effectués par la roue en une seconde : ce nombre était 12,6 dans l'expérience ; comme on connaît d'ailleurs le nombre des dents de la roue (ce nombre était 720 dans l'appareil de Fizeau), on en déduit la valeur de la fraction de seconde qui représente, pour cette vitesse de rotation, le temps nécessaire à la substitution d'un *plein* au *creux* qui le précède. Avec les chiffres précédents, le nombre total des intervalles pleins et vides qui se succèdent en P en un tour de roue est 720×2 ou 1440 ; par suite, en une seconde ou en 12,6 tours, ce nombre est de $1440 \times 12{,}6$ ou 18144 ; le temps nécessaire à la substitution d'un plein au creux précédent est 18144 fois plus petit, ou $\frac{1}{18144}$s. Cette fraction de seconde est le temps que met la lumière pour franchir l'espace qui sépare les deux stations, aller et retour, soit 17266 mètres ou 17,266 km. En une seconde, la lumière franchit donc un

(*) Ainsi, lorsque, dans l'obscurité, on tient un charbon allumé, avec lequel on trace rapidement une courbe dans l'air, la courbe nous paraît lumineuse en chacun de ses points en même temps.

espace 18 144 fois plus grand, et la *vitesse de la lumière* dans l'air est, en kilomètres par seconde, 17266×18144, ou environ 313 000.

9. *Résultats.* — De nouvelles expériences, faites depuis par divers autres physiciens, soit au moyen de la même méthode, soit au moyen d'une autre méthode indiquée par Foucault, ont donné des nombres compris entre 299 800 et 300 000 kilomètres par seconde. — Nous adopterons le nombre rond de 300 000 kilomètres par seconde, comme valeur de la vitesse de la lumière dans le vide ou dans l'air. En centimètres par seconde, cette vitesse est donc de 3×10^{10} (*).

III. — Photométrie.

10. *Notion de sources lumineuses plus ou moins intenses, et d'éclairements plus ou moins grands.* — Lorsqu'on éclaire successivement une même salle au moyen de différentes sources lumineuses placées au même point, bougie, bec de gaz, lampe électrique, etc., les objets et les murs de la salle nous paraissent plus ou moins éclairés. Les sources lumineuses se différencient donc entre elles par un *pouvoir éclairant* ou une *intensité lumineuse*, qui varie de l'une à l'autre. — D'autre part, lorsqu'on présente un écran de carton blanc mat à la lumière d'une source constante, on trouve que, selon la distance de l'écran à la source, ou selon l'orientation qu'il présente par rapport aux rayons lumineux, l'impression qu'il produit sur notre œil est variable : l'écran nous paraît d'autant moins éclairé qu'il est plus éloigné de la source, ou qu'il reçoit plus obliquement les rayons. — Si donc nous voulions comparer entre elles deux sources lumineuses au point de vue de leur pouvoir éclairant, et c'est là le but de la photométrie, il faudrait comparer les éclairements produits simultanément par ces sources sur deux portions d'un même écran, *dans les mêmes conditions de distance et d'obliquité*.

Mais, dans ces conditions, notre œil, qui apprécie l'inégalité de deux éclairements, et reconnaît quel est le plus grand, ne nous permet pas de dire si l'un des éclairements est double, ou triple de l'autre ; il ne peut évaluer que l'*égalité* des éclairements comparés

(*) D'après ce résultat, la lumière du Soleil, qui, pour arriver jusqu'à nous, doit parcourir le rayon moyen de l'orbite terrestre, ou environ 149 500 000 km, met à peu près 8 min 18 s pour nous parvenir. Pour aller du Soleil aux confins du système solaire, à la planète Neptune, il lui faut environ 4 h 10 m.

L'étoile la plus rapprochée de la Terre, α du Centaure (invisible en Europe), étant à une distance de 280 000 fois le rayon de l'orbite terrestre, sa lumière met 4 ans et 4 mois à nous parvenir. Celle de l'étoile Polaire, la plus éloignée parmi les étoiles dont on ait pu déterminer la distance à la Terre, ne nous arrive qu'au bout de 46 ans et demi.

Encore est-il nécessaire, pour que cette égalité soit appréciable, qu'il s'agisse de lumières de même couleur.

Les comparaisons photométriques devront donc nécessairement s'effectuer par la constatation d'une égalité d'éclairement.

11. ***Comparaison expérimentale des intensités lumineuses des diverses sources.*** — Deux sources sont dites d'*égale intensité* lumineuse, lorsque, placées à la même distance du même écran, qu'elles éclairent sous la même obliquité, elles y produisent deux éclairements égaux. — Une source est dite d'une *intensité double* d'une autre, lorsqu'elle éclaire comme deux sources égales à cette autre, c'est-à-dire lorsque, toutes choses égales d'ailleurs, elle produit un éclairement égal à celui de deux sources identiques à la première, et ainsi de suite.

Puisque, d'après l'analyse précédente, nous ne pouvons comparer entre elles les intensités des diverses sources que par la constatation d'une égalité d'éclairement, nous sommes amenés à résoudre expérimentalement le problème suivant :

Étant données des sources lumineuses dont les rapports d'intensité sont connus par définition, chercher comment varient les distances de ces sources à un écran pour qu'elles l'éclairent également sous la même obliquité.

Pour cela, nous prendrons l'appareil suivant : dans une paroi opaque MN (*fig.* 10) se trouve ménagé un disque translucide, séparé

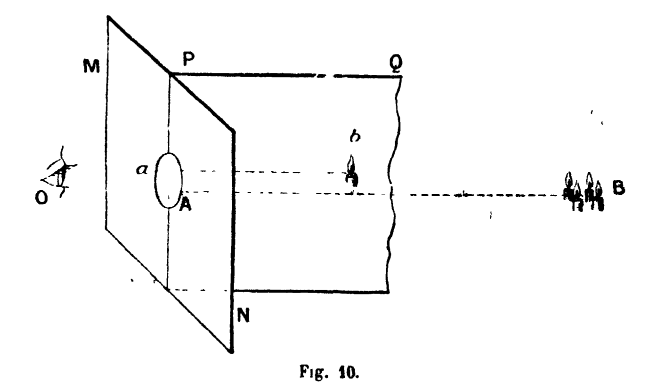


Fig. 10.

en deux moitiés A et a par une cloison perpendiculaire PQ. Plaçons d'un côté de la cloison, à la distance d, une bougie b éclairant à peu près perpendiculairement la moitié a de l'écran translucide, et, de l'autre côté, plusieurs bougies identiques, en un faisceau B éclairant à peu près perpendiculairement la moitié A de l'écran. On pourrait

craindre que l'une des flammes n'arrête une partie des rayons émis par une autre ; mais il n'en est rien, car l'expérience a montré que les flammes sont transparentes. — Lorsque, en éloignant convenablement le faisceau B, on a obtenu l'égalité d'éclairement, c'est-à-dire lorsque la surface tout entière du disque A*a* paraît uniformément éclairée, on mesure la distance d' du faisceau B au demi-disque A.

Dans une première série d'expériences, où l'on a pris $d = 50$ cm, on trouve, par exemple, en constituant successivement le faisceau B par 4, 3 et 2 bougies :

Avec 4 bougies, $d' = 100$ cm,
— 3 — $d' = 85$ cm,
— 2 — $d' = 71$ cm.

Comparons maintenant, d'une part, les intensités I′ et I des deux sources B et *b*, et, d'autre part, leurs distances d' et d à l'écran A*a* qu'elles éclairent également; on obtient le tableau suivant

$\frac{I'}{I}$	$\frac{d'}{d}$
4	2 ou $\sqrt{4}$
3	1,70 ou $\sqrt{3}$ sensiblement
2	1,42 ou $\sqrt{2}$

— Ces résultats sont d'ailleurs indépendants de la valeur particulière de d; car, si l'on effectue une seconde série d'expériences avec $d = 25$ cm, par exemple, on obtient les résultats suivants :

$\frac{I'}{I}$	d'	$\frac{d'}{d}$
4	50 cm	2 ou $\sqrt{4}$
3	42 cm	1,72 ou $\sqrt{3}$ sensiblement
2	35 cm	1,40 ou $\sqrt{2}$ sensiblement.

D'une façon générale, pour que deux sources lumineuses d'intensités différentes I et I′ produisent un même éclairement à des distances respectives d et d', il faut que l'on ait les deux relations simultanées :

$$\frac{I'}{I} = n \quad \text{et} \quad \frac{d'}{d} = \sqrt{n}.$$

On tire de là :

$$\frac{I'}{I} = n = \frac{d'^2}{d^2},$$

d'où cette loi expérimentale : *les intensités de deux sources lumineuses sont entre elles dans le même rapport que les carrés des distances à un même écran qu'elles éclairent également, sous la même obliquité.*

C'est sur ce théorème que sont fondés les photomètres, appareils destinés à fournir la mesure de l'intensité I′ d'une source lumineuse en fonction de l'intensité I d'une autre source prise comme unité.

12. ***Photomètre de Foucault*** (*). — Ce photomètre, qui n'est qu'une modification du dispositif de la figure 10, est constitué par une caisse ABCD (*fig.* 11) noircie intérieurement, présentant dans sa paroi antérieure AC un petit écran circulaire E, translucide, et généralement formé d'une couche homogène d'amidon de betterave, déposée sur une lame de verre. A l'intérieur de la boîte est une *cloison mobile* MN, perpendiculaire à l'écran en son milieu. De part et d'autre de cette cloison, on place les deux sources lumineuses S et S′ sur des règles divisées, également inclinées sur la normale à l'écran translucide. Lorsque, en déplaçant l'une des sources, on a obtenu approximativement l'égalité d'éclairement des deux plages de l'écran, on déplace la cloison mobile perpendiculairement à l'écran, de façon à amener, grâce au rebord N, la juxtaposition aussi parfaite que possible des deux plages éclairées; on assiste ainsi à la disparition du diamètre de séparation de ces deux plages. Pour obliger l'œil à regarder normalement, on dispose en avant de la boîte une sorte de cornet, à l'extrémité duquel on place l'œil O sur la normale au centre de l'écran. — Les expériences de mesure doivent toujours se faire dans une chambre obscure.

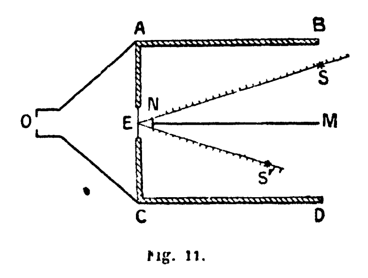


Fig. 11.

L'expérience a montré que l'erreur relative, provenant du défaut de sensibilité de l'œil dans l'évaluation d'une égalité d'éclairement, est à peu près constante, quelle que soit l'intensité, dans d'assez larges limites. Cette erreur est de l'ordre de 1/50 environ. Cela veut dire que, à la même distance, les éclairements d'une source de 49 ou d'une source de 51 bougies ne pourraient se distinguer de celui d'une source de 50 bougies.

(*) Foucault (1819-1868), savant français, auteur de nombreux travaux sur l'Optique et l'Électricité. Il est surtout connu par son expérience de démonstration de la rotation de la Terre au moyen du pendule, et par sa mesure des vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau.

13. *Photomètre de Rumford* (*). — Dans le *photomètre de Rumford*, les deux sources L et B (*fig.* 12) sont placées devant un même

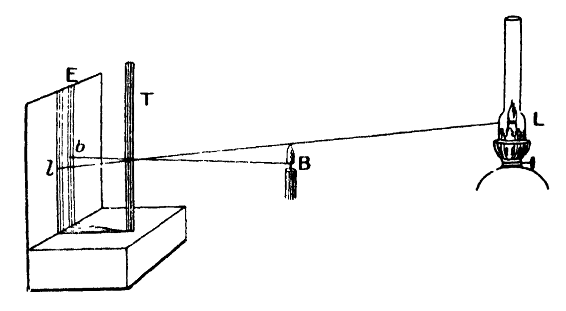


Fig. 12.

écran blanc E : entre elles et l'écran, on dispose une tige de bois verticale T. On obtient ainsi deux ombres : la première *b*, portée par la source B, ne reçoit de lumière que de la source L ; la seconde *l*, portée par la source L, ne reçoit de lumière que de B, et sous le même angle. Si donc on fait varier la distance de l'une des deux sources à l'écran, jusqu'à ce que les deux ombres paraissent identiques, et si l'on mesure alors les distances de chaque source à l'ombre *qu'elle éclaire*, les intensités de ces sources seront entre elles comme les carrés de ces distances.

14. *Unités d'intensité lumineuse.* — Les unités adoptées pour évaluer numériquement les intensités des diverses sources lumineuses ont d'abord été assez arbitraires, et parfois même insuffisamment définies. — Ainsi, on a pris d'abord l'intensité de la flamme d'une *bougie* ordinaire. — On a pris ensuite une unité mieux définie, le *carcel* ; c'est l'intensité, dans une direction horizontale, de la flamme d'une lampe Carcel, brûlant à l'heure 42 grammes d'huile de colza épurée. Le carcel vaut environ 8 bougies.

Enfin, en 1884, dans une Conférence internationale, on a adopté, comme *unité absolue*, sur la proposition de M. Violle, l'intensité, dans une direction normale, d'un cm^2 d'une surface de platine incandescent, à la température de solidification du métal. L'étalon Violle vaut 2,08 carcels, et par suite environ 16 bougies.

Cette unité étant un peu trop grande pour les applications industrielles, le Congrès des Électriciens, réuni à Paris en 1889, a fixé une *unité pratique*, qui a reçu le nom de *bougie décimale*, et qui vaut

(*) Rumford (Benjamin Thomson, comte de, (1753-1814) est surtout connu par ses travaux sur la Chaleur. Il avait entrevu l'équivalence de la chaleur et du travail.

1/20 de l'unité absolue. — Ce choix a été déterminé par cette considération que le carcel, valant à peu près la moitié de l'unité absolue (environ 0,48), représente alors sensiblement 10 bougies décimales. La bougie décimale vaut donc environ 8/10 de bougie ordinaire.

15. ***Intensités de quelques sources lumineuses.*** — La *lampe électrique à incandescence* de modele courant (369), a une intensité de 16 bougies décimales. — Le *manchon Auer* a une intensité moyenne de 14 bougies par cm² (l'intensité par cm² s'appelle l'*éclat* d'une source).

Le *Soleil* est un luminaire d'une intensité telle qu'il éclaire un écran comme le ferait une source de 77 000 bougies décimales, placée à 1 m. — Quant à la *Lune*, elle ne nous éclaire que comme une bougie décimale placée à 2 m.

16. ***Loi de variation des éclairements produits par une même source, avec la distance.*** — Admettons, pour l'addition des éclairements, une définition analogue à celle que nous avons adoptée pour l'addition des intensités (11), à savoir qu'*un éclairement est double, triple d'un autre*, lorsqu'il est *égal à l'éclairement produit par deux, trois sources identiques*, agissant ensemble dans les mêmes conditions. De cette définition, et des expériences indiquées au paragraphe précédent, il résulte alors qu'une bougie placée à la distance $2d$ éclaire quatre fois moins qu'une bougie placée à la distance d, puisqu'il faut quatre bougies à cette distance $2d$ pour produire le même éclairement qu'une seule à la distance d. Donc les éclairements produits par une même source à différentes distances, sur une surface recevant perpendiculairement les rayons, varient en *raison inverse des carrés des distances de la source à l'écran*; de plus, *par définition*, ils sont *proportionnels aux intensités des sources.*

Si donc l'on convient de prendre comme unité d'éclairement, l'éclairement produit par une source d'intensité égale à une bougie décimale, éclairant normalement un écran placé à une distance de 1 m, la formule $\boxed{e = \frac{I}{d^2}}$ exprimera l'éclairement produit par une source de I bougies, placée à une distance de d mètres d'un écran recevant perpendiculairement les rayons.

L'unité d'éclairement ainsi choisie a reçu le nom de *lux* ou *bougie-mètre*.

Si la surface éclairée est oblique sur les rayons lumineux, et que i soit l'angle des rayons avec la normale à la surface, on démontre que l'éclairement oblique e' est égal au produit par cos i, de l'éclairement normal e produit par la même source placée à la même distance de l'écran :

$$e' = e \cos i, \quad \text{ou} \quad \boxed{e' = \frac{I \cos i}{d^2}}.$$

CHAPITRE II

RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE

I. — Miroirs plans. — Lois de la réflexion.

17. ***Phénomènes produits par un faisceau lumineux arrivant à la surface de séparation de deux milieux homogènes différents. réflexion, réfraction, diffusion.*** — Lorsqu'un faisceau lumineux arrive à la surface de séparation de deux milieux homogènes différents, une première portion de la lumière incidente fait retour dans le milieu antérieur, suivant une nouvelle direction rectiligne; c'est le phénomène de la *réflexion*. Une seconde portion de la lumière passe dans le second milieu, et les rayons suivent également, dans ce second milieu, une nouvelle marche rectiligne déterminée; c'est le phénomène de la *réfraction*. Enfin, une troisième portion de la lumière incidente est renvoyée dans toutes les directions, à partir de la surface de séparation; c'est le phénomène de la *diffusion*. La portion de lumière diffusée est d'autant plus petite que la surface de séparation est mieux polie, mais elle n'est jamais absolument nulle. C'est cette lumière diffusée qui nous révèle la présence des surfaces de séparation des milieux transparents. — Les trois phénomènes que nous venons d'indiquer se produisent simultanément. Nous allons étudier, dans ce chapitre, le phénomène de la réflexion; le chapitre suivant sera consacré à l'étude de la réfraction.

18. ***Étude expérimentale des miroirs plans.— Images virtuelles.*** —Pour découvrir les lois du phénomène de la réflexion, il va nous suffire de regarder ce qui se passe lorsque la lumière se réfléchit sur un miroir *plan*.

Plaçons-nous devant une glace, c'est-à-dire devant un miroir plan vertical, formé par une lame de verre à faces parallèles, derrière laquelle on a déposé une mince couche d'argent, ou d'amalgame d'étain, qu'on appelle le *tain* des glaces. Nous apercevons notre image, qui nous fait face derrière la glace. Ce n'est évidemment là qu'une illusion, cette image n'existe pas réellement, puisque la

lumière que nous émettons, en tant que corps lumineux, ne dépasse pas la surface argentée. Notre image s'éloigne de la glace, si nous nous en éloignons; elle s'en rapproche, si nous nous en rapprochons, mais elle semble toujours située à la *même distance* de la glace que nous-même, et nous reste toujours *égale* en grandeur. — D'autre part, si nous levons le bras droit, l'image lève son bras gauche, et réciproquement. L'image ne serait donc *pas superposable* à l'objet; c'est ce que la Géométrie exprime en disant que l'image est *symétrique* de l'objet par rapport au plan du miroir. — Pour nous assurer plus exactement de la symétrie de l'image et de l'objet par rapport au miroir, faisons une expérience avec une glace mince sans tain, qui nous permette d'apercevoir, à la fois, une image produite par réflexion, et un objet situé au delà de la glace, visible par transparence. Plaçons, de part et d'autre de cette glace M (*fig.* 13), deux bougeoirs, garnis de bougies identiques, disposées à égale distance, bien symétriquement, et allumons la bougie qui est de notre côté. Aussitôt nous croyons voir s'allumer la bougie qui est en arrière, et cela quelle que soit la position que nous occupions.

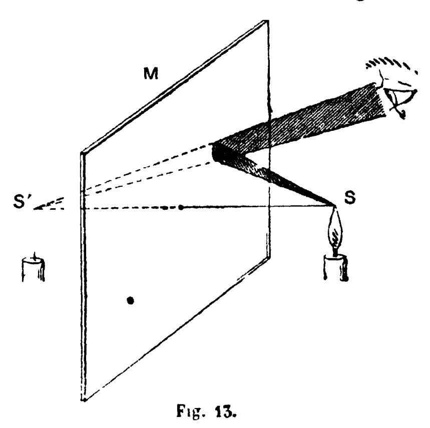


Fig. 13.

En résumé, tous les rayons lumineux émanés d'un même point S (*fig.* 13), et réfléchis sur un miroir plan M, semblent, pour notre œil qui les reçoit, provenir d'un même point S', symétrique de S par rapport au miroir. Or, lorsque des rayons émanés d'un point viennent, après des changements de direction produits pour une cause quelconque, passer tous *par un même autre point*, ce second point est appelé l'*image* du premier : dans le cas actuel, le point S' est donc l'image du point S, et l'image de l'objet est bien symétrique de cet objet par rapport au plan réflecteur. Cette image, produite par l'intersection des *prolongements des rayons* et non par ces rayons eux-mêmes, est appelée, pour cette raison, image *virtuelle*.

19. ***Lois de la réflexion déduites de l'étude des miroirs plans.*** — Soit un point lumineux S (*fig.* 14); abaissons de ce point la perpendiculaire SH sur le miroir plan M, et prenons sur cette perpendiculaire le symétrique S' de S par rapport au miroir, c'est-à-dire tel que

HS' = HS. Considérons ur rayon incident quelconque SI : le ravon réfléchi IR est dirigé suivant le prolongement de S'I. Or, si l'on mène au point I la normale IN au miroir, elle est parallèle à SH; elle est donc située dans le plan SIH, puisqu'elle y a le point I, et qu'elle est parallèle à une droite de ce plan.

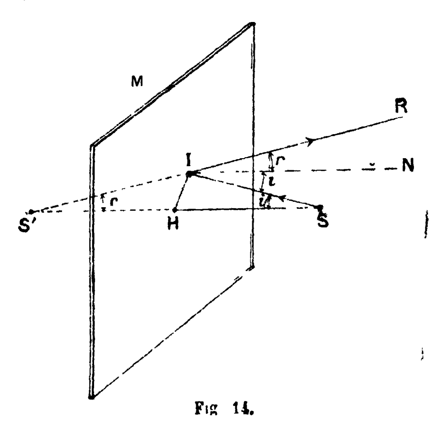


Fig 14.

D'où la *première loi* : le *rayon incident* SI, *la normale* IN, *et le rayon réfléchi* IR, *sont dans un même plan*, qu'on appelle le *plan d'incidence*.

Désignons, d'autre part, par i l'angle SIN ou *angle d'incidence*, et par r l'angle NIR ou *angle de réflexion*. L'angle i et l'angle ISH sont égaux comme alternes-internes; l'angle r et l'angle IS'H sont égaux comme correspondants. Or les angles ISH et IS'H sont égaux, comme angles à la base d'un triangle isocèle IS'S (la hauteur IH étant perpendiculaire au milieu de la base SS').

De là, cette *seconde loi* : *l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence.*

Ces deux lois de la réflexion, que nous venons ainsi de déduire des résultats fournis par les miroirs plans, sont d'ailleurs confirmées par les expériences les plus précises, ainsi que par l'accord de leurs conséquences avec tous les faits observés. — L'expérience montre qu'elles s'appliquent également au cas où la réflexion a lieu sur une surface courbe quelconque: tout se passe alors comme si la réflexion avait lieu sur le plan tangent à la surface, au point d'incidence de chaque rayon.

20. ***Objet virtuel, image réelle.*** — Il résulte de la symétrie même du rayon incident et du rayon réfléchi par rapport à la normale au point d'incidence, que ces deux rayons, dans une marche inverse de la lumière, doivent s'intervertir l'un l'autre. Si donc on considère des rayons lumineux qui seraient dirigés vers le point S' (*fig.* 13) mais qui sont interceptés par le miroir plan M, ces rayons viendront après réflexion passer réellement par le point S symétrique de S' par rapport au miroir. On dit, dans ce cas, que le point S' est un *point lumineux virtuel* par rapport au miroir M, et que le point S en est une *image réelle*, parce qu'elle est formée par les rayons lumineux

se coupant eux-mêmes en ce point, et non par leurs prolongements géométriques.

21. ***Champ d'un miroir plan, pour une position donnée de l'œil.*** — Lorsqu'on est placé devant un miroir, on ne voit, par réflexion dans ce miroir, qu'une portion de l'espace situé en avant. On appelle *champ* d'un miroir plan, pour une position donnée de l'œil, la région de l'espace dans laquelle doit se trouver un point lumineux, pour que son image soit visible. — La remarque suivante permet de déterminer géométriquement cette région : pour qu'un rayon, après réflexion, arrive à l'œil supposé réduit à un point O (*fig.* 15), il faut qu'il soit dirigé, avant réflexion, vers le point O′ symétrique de l'œil O par rapport au miroir MN; le champ sera donc limité, pour les objets matériels, par la portion de nappe conique, située en avant du miroir, ayant pour sommet le point O′, et pour directrice le contour MN du miroir.

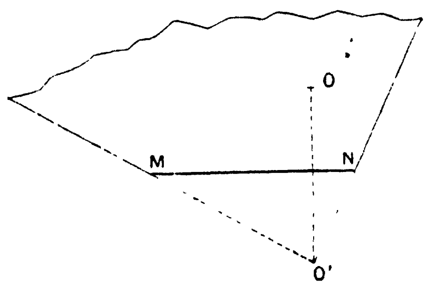


Fig. 15.

22. ***Miroirs plans parallèles.*** — Si un objet lumineux S (*fig.* 16) est situé entre deux miroirs plans parallèles A et B, placés en face l'un de l'autre, par exemple entre deux glaces parallèles, on sait qu'il se produit, derrière chacune d'elles, un nombre en quelque sorte *illimité* d'images. Il est facile de s'en rendre compte. Supposons, par

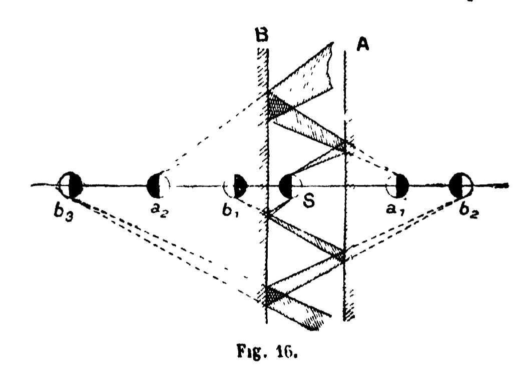


Fig. 16.

exemple, que l'objet S soit une sphère ayant un hémisphère blanc et un hémisphère noir, se raccordant suivant un grand cercle parallèle aux miroirs; prenons comme plan de figure un plan passant par le centre et perpendiculaire aux miroirs. Les rayons lumineux qui ont subi une première réflexion sur le miroir A donnent naissance à une première image a_1. Mais, ces rayons réfléchis venant à rencontrer le miroir B, l'image virtuelle a_1 se comporte, pour le second miroir, comme un objet réel; ce miroir en donne une image a_2, et ainsi de suite. On obtient donc ainsi la première série d'images a_1, a_2, a_3, .. , que nous dénommons de la sorte pour rappeler que cette série a commencé par une réflexion sur le miroir A; si l'hémisphère blanc est tourné vers A, toutes ces images tournent leur hémisphère blanc du côté des miroirs. Il se produit de même une autre série d'images b_1, b_2, b_3, ..., provenant de réflexions qui ont commencé sur le miroir B; si l'hémisphère noir est tourné vers B, toutes ces images tournent leur hémisphère noir du côté des miroirs. Avec nos notations, les images d'indices impairs, dans chaque série, sont situées derrière le miroir par lequel ont commencé les réflexions, et les images d'indices pairs sont situées derrière l'autre. — On voit sans peine sur la figure que, derrière chaque miroir, les images des deux séries alternent entre elles, les indices allant en croissant régulièrement d'une unité : ainsi, derrière A, on a les images successives a_1, b_2, a_3, ...; derrière B, les images successives b_1, a_2, b_3,... Ces images sont alternativement *symétriques* de l'objet, et symétriques des symétriques, ou *semblables* à l'objet, ainsi que le montre la figure.

23. ***Miroirs plans angulaires.*** — Lorsqu'un objet lumineux se trouve placé entre deux miroirs faisant entre eux un certain angle, on constate l'existence d'un nombre *limité* d'images. Il est facile de s'en rendre compte. Supposons, par exemple, l'objet S (*fig.* 17) constitué par un hémisphère blanc et un hémisphère noir, se raccordant suivant un grand cercle dont le plan passe par l'arête des miroirs, et prenons comme plan de figure le plan passant par le centre et perpendiculaire à l'arête. Ce plan contiendra les centres de toutes les images successives, situés à la distance OS de l'arête O des deux miroirs. Ces centres seront donc distribués sur la circonférence décrite de O comme centre avec OS comme rayon.

Considérons le cas où l'angle AOB des deux miroirs est de 60°, c'est-à-dire est compris 6 fois dans la circonférence. Supposons la sphère-objet S placée à 10° du miroir A et par suite à 50° du miroir B. Construisons les images successives. Les rayons qui subissent leur première réflexion sur le miroir A donnent lieu à une première image a_1, située à 10° derrière le miroir A. L'image suivante a_2 est à 10° + 60° ou 70° derrière B. Enfin l'image a_3 est à 70° + 60° ou

130° derrière A : elle est donc dans l'angle A'OB', opposé par le sommet à celui des miroirs, puisque AOB' = 120°; elle se trouve par conséquent à 10° en arrière de B'. C'est la dernière image de cette série, car tous les rayons qui émanent d'un point quelconque de a_3 constituent un cône qui a ce point pour sommet et qui est circonscrit au miroir A; aucun d'eux ne peut plus rencontrer le miroir B. De même, les rayons qui ont subi leur première réflexion sur B donnent lieu à une première image b_1, située à 50° derrière B; l'image suivante b_2 est à 50° + 60° ou 110° derrière A; elle est donc à 10° devant B', et par suite l'image finale b_3 est exactement superposée à a_3, noir sur noir et blanc sur blanc. Il en serait de même pour une position quelconque de l'objet. Il serait facile, pour compléter la figure 17, de tracer la marche de faisceaux lumineux émanant d'un point de l'objet, comme on l'a fait sur la figure 16. — On a donc en tout 5 images distinctes : a_1, b_1 et a_3, *symétriques* de l'objet, a_2 et b_2 *semblables* à l'objet; en y comprenant l'objet lui-même, cela fait donc 6 fois la répétition alternée de l'objet et de son symétrique.

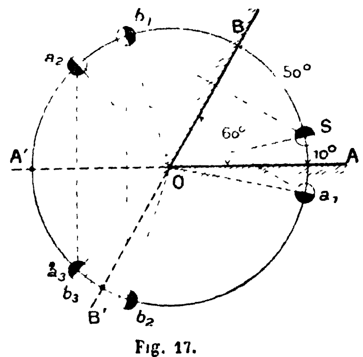


Fig. 17.

D'une façon générale, si l'on désigne par N le nombre entier de fois, pair ou impair, que l'angle des miroirs est compris dans la circonférence, avec ou sans reste, on trouve que le nombre total des images lumineuses réparties sur la circonférence, y compris l'objet lui-même, est au plus N + 2, et au moins N. — Ce dernier cas est réalisé en particulier, comme on vient de le voir, lorsque N est pair et sans reste.

24. *Kaléidoscope.* — Le *kaléidoscope* est une application des considérations qui précèdent, correspondant au cas où N est exactement égal à 6. Cet appareil est formé par un tube de carton ou de métal, dans lequel sont fixés deux miroirs inclinés, placés de manière que leur intersection soit dirigée parallèlement à l'axe du tube. L'angle des deux miroirs est de 60°. A l'une des extrémités du tube se trouvent de petits fragments de verre, de diverses couleurs, placés entre deux plaques de verre, dont celle qui est à l'extérieur est dépolie. L'œil appliqué à l'autre extrémité du tube aperçoit, en une sorte de rosace à six branches, la figure formée par les fragments de verre alternant avec la figure symétrique. — En secouant le tube, ou en le faisant tourner sur lui-même, on modifie la dispo-

sition des fragments de verre les uns par rapport aux autres, et on peut ainsi faire subir une multitude de transformations à la figure régulière qu'ils forment avec leurs images.

II. — Miroirs sphériques : étude expérimentale.

25. *Miroirs sphériques.* — *Définitions.* — Une surface courbe peut, en chacun de ses points, être considérée comme se confondant avec le plan tangent en ce point. L'expérience montre que tout rayon lumineux qui rencontre une surface courbe se réfléchit comme il le ferait sur le plan tangent mené au point d'incidence.

Nous nous bornerons à l'étude des miroirs *sphériques*. Ces miroirs sont dits *concaves* ou *convexes*, selon que leur face réfléchissante est la face interne ou la face externe de la portion de surface sphérique qui les constitue.

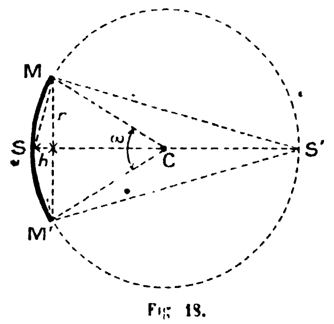


Fig. 18.

La *base* du miroir est le plan du petit cercle MM' (*fig.* 18), qui en forme le bord. — On appelle *axe principal* la perpendiculaire CS menée du centre C de la sphère sur le plan de base. Tout autre diamètre de la sphère est un *axe secondaire.* — Le point S où l'axe principal rencontre la surface réfléchissante est appelé le *sommet* du miroir.

Un plan quelconque passant par l'axe principal constitue une *section principale*, et coupe le miroir suivant un arc de grand cercle MSM'. — L'*ouverture* du miroir est l'angle MCM' formé par les droites menées du centre aux extrémités de l'arc MM'.

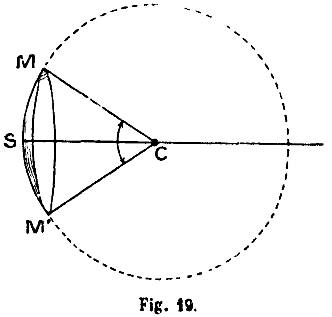


Fig. 19.

26. *Étude expérimentale des miroirs sphériques concaves.* — *Rayon de courbure et ouverture.* — Lorsqu'on veut se servir d'un miroir sphérique concave, la première chose à faire est de déterminer, tout au moins approximativement, le rayon de la sphère à laquelle il appartient. Il suffit pour cela de mesurer, d'une part, le diamètre MM' (*fig.* 19) du cercle de la base du miroir, ce qui four-

nit le rayon r de ce cercle, et, d'autre part, la distance h du sommet S du miroir au plan de ce cercle. Si l'on joint le point M au sommet S et au point diamétralement opposé S', on forme un triangle rectangle SMS', dans lequel la hauteur r est moyenne proportionnelle entre les deux segments h et $2R-h$ qu'elle détermine sur l'hypoténuse. On a donc :

$$r^2 = h(2R-h), \quad \text{d'où l'on tire } R = \frac{r^2+h^2}{2h}.$$

Si l'on a trouvé, par exemple, $r = 10$ cm et $h = 0,5$ cm, on a :

$$R = \frac{100 + 0,25}{1} = 100,25 \text{ cm, ou } 100 \text{ cm environ.}$$

La connaissance de r et de R permet d'évaluer approximativement l'angle d'ouverture ω du miroir. On a en effet sensiblement, en confondant l'arc MM' avec sa corde,

$$\frac{2r}{R} = \omega \text{ radians}(*).$$

On en tire pour la valeur n de l'angle en degrés ou en grades,

$$n^\circ = \omega \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = \omega \times 57^\circ 17' 45'', \text{ ou } n^G = \omega \cdot \frac{200^G}{\pi} = \omega \times 63,662 \text{ G}.$$

Si, par exemple, $R = 100$ cm et $r = 10$ cm, il en résulte

$$\omega = \frac{20}{100} = 0,2 \text{ radian,}$$

d'où

$$n^\circ = 0,2 \times 57^\circ 17' 45'' = 11^\circ 30' \text{ environ,}$$
$$n^G = 0,2 \times 63,662 \text{ G} = 12,7 \text{ G}.$$

(*) Rappelons, en quelques lignes, les principes de la mesure des angles.

On sait que les arcs de cercle interceptés par un même angle au centre croissent proportionnellement à leurs rayons. Il en résulte que le rapport de la longueur d'un de ces arcs à son rayon est constant, comme l'angle lui-même. Ce rapport constant exprime le nombre de fois que l'arc en question contient l'arc égal au rayon, c'est-à-dire le nombre de fois que l'angle correspondant contient l'angle au centre qui intercepterait entre ses côtés un arc égal au rayon. Ce nombre est la mesure de l'angle proposé, si l'on prend, comme unité d'angle, l'angle au centre qui intercepte entre ses côtés un arc égal au rayon. Cet angle unité a reçu le nom de *radian*. La mesure d'un angle en radians est donc immédiatement fournie par le rapport des longueurs d'un arc intercepté et du rayon correspondant. Ainsi l'angle répondant à une demi-circonférence a pour mesure dans ce système $\frac{\pi R}{R} = \pi$ radians ou 3,14 radians. De même, l'angle d'un quadrant a pour mesure $\frac{\pi}{2}$ radian, ou 1,57 radian. Mais, un autre système de mesure des angles consiste à les évaluer en fonction de l'angle au centre qui intercepte entre ses côtés un arc égal à la 360e partie (degré), ou à la 400e partie (grade G) de la circonférence. Puisque π radians correspondent à 180° ou 200 G, le radian correspond à $\frac{180^\circ}{\pi} = 57^\circ 17' 45''$ ou à $\frac{200^G}{\pi} = 63,662$ G. Il est alors facile, d'après cela, de passer d'une mesure en radians à une mesure en degrés ou en grades.

27. ***Conditions générales nécessaires pour obtenir de bonnes images. — Rayons centraux. — Plans conjugués.*** — Lorsque, de préférence dans une chambre noire, on place un objet lumineux de faibles dimensions, tel que la flamme d'une bougie, d'un bec de gaz, etc., devant un miroir sphérique concave, l'expérience montre que l'on peut obtenir des images réelles, rendues visibles de toutes parts, au moyen d'un écran diffusant de papier ou de verre dépoli. Le cône de rayons qui diverge d'un point est donc transformé par la réflexion, en un nouveau cône, qui converge au point-image. Lorsque l'écran est exactement dans la position de l'image, celle-ci présente un maximum de netteté : on dit qu'elle est *au point* sur l'écran; mais l'image n'est considérée comme *bonne*, que si elle est à la fois *nette* et *semblable à l'objet*.

Or, si l'on place la flamme de la bougie au delà du centre, dans le voisinage de l'axe principal, et si le miroir a une ouverture trop grande, on trouve que l'image, située entre le centre et le miroir, n'est bien nette pour aucune position de l'écran On améliore alors beaucoup l'image en diaphragmant le miroir, c'est-à-dire en cachant les bords du miroir au moyen d'un anneau de papier : on diminue ainsi l'ouverture — La *première condition* pour obtenir des images nettes est donc *que l'ouverture du miroir soit assez faible*; en pratique, elle ne doit pas dépasser 5 à 6 degrés.

Cette première condition supposée remplie, si l'on vient à écarter peu à peu la bougie de l'axe principal, on constate que l'image s'en écarte de l'autre côté, mais qu'elle perd encore de sa netteté, pour finir même par disparaître complètement lorsqu'on est trop éloigné du cône d'ouverture. Les objets doivent donc rester dans le voisinage de l'axe principal, et il en résulte que l'objet ne doit pas être de trop grandes dimensions, car, s'il en était ainsi, les bords de l'objet se trouveraient nécessairement éloignés de l'axe principal, et les bords de l'image pourraient ne pas être nets. C'est ce que l'on peut facilement constater par l'expérience. — La *seconde condition* de netteté des images est donc *que les objets restent compris au voisinage de l'axe principal.* Puisque, d'une part, le miroir doit avoir une faible ouverture, et que, d'autre part, les points lumineux doivent rester compris dans le cône d'ouverture, il en résulte que les normales aux divers points d'incidence font de petits angles avec l'axe secondaire du point lumineux : les rayons correspondants sont dits des *rayons centraux*; on énonce donc les résultats précédents en disant que, pour obtenir des images nettes, il faut avoir affaire à des *rayons centraux*.

Enfin, lorsqu'un objet plan est d'assez grandes dimensions (un grand quadrillage, par exemple), si on le place obliquement par rapport à l'axe principal, au lieu de le disposer perpendiculairement,

on constate que, sur l'écran, orienté de façon que l'image soit aussi bien au point que possible, cette image est déformée. L'image n'est donc semblable à l'objet que lorsqu'ils sont tous deux perpendiculaires à l'axe principal. — La *troisième condition* pour obtenir de bonnes images est donc *que les objets soient disposés perpendiculairement à l'axe principal.* Les plans perpendiculaires à l'axe, et contenant l'objet et l'image, sont appelés *plans conjugués.*

28. ***Objet lumineux placé au centre du miroir : image réelle, renversée, égale à l'objet.*** — Plaçons la flamme d'une bougie B

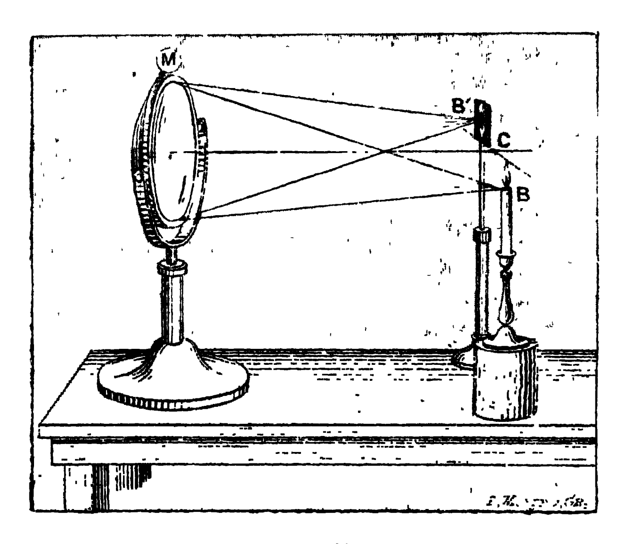


Fig. 20.

(*fig.* 20) dans le plan perpendiculaire à l'axe principal passant exactement par le centre C du miroir M. On constate alors, au moyen de l'écran, que le miroir donne une *image nette, réelle, renversée, égale à l'objet, située dans le même plan, et symétrique par rapport au centre.* — Il résulte de là que le plan perpendiculaire à l'axe principal passant par le centre est lui-même son conjugué; les rayons partis d'un point B de ce plan vont, après réflexion, converger réellement en un point B' du même plan, symétrique de B par rapport au centre C. En particulier, des rayons partis du centre C se réfléchiraient sur eux-mêmes et reviendraient tous passer par le centre. Ils se réfléchissent donc bien comme ils le feraient sur les plans tangents aux points d'incidence (19). — On voit que, si l'on ne connaît pas le rayon R d'un miroir concave, ou si l'on n'a pas

pu le déterminer géométriquement, on peut se servir du caractère optique tiré de cette expérience, pour déterminer le centre, et par suite mesurer le rayon.

29. ***Image du Soleil. — Plan focal. — Foyer principal.*** — Les divers points de la surface du Soleil sont situés à une telle distance de nous (150 000 000 de km en moyenne), que tous les rayons qui émanent d'un même point, et tombent sur nos appareils, constituent un cône d'angle tellement petit, qu'on peut le considérer comme rigoureusement nul. Le faisceau lumineux formé par ces rayons peut donc être considéré comme cylindrique. Mais les divers points de la surface du Soleil ne sont pas tous situés, par rapport à nous, dans la même direction, puisque le Soleil nous apparaît comme un disque dont le diamètre est vu sous un angle moyen de 32 minutes environ : cet angle est ce qu'on appelle le *diamètre apparent* du Soleil. Les faisceaux cylindriques extrêmes émanant de deux bords opposés du disque solaire font donc entre eux cet angle de 32 minutes. Faisons tomber ces rayons sur un miroir sphérique concave S (*fig.* 21), de faible ouverture, dont l'axe principal sera sensiblement orienté suivant la direction moyenne des faisceaux, c'est-à-dire fera 16′ avec chacun des faisceaux extrêmes.

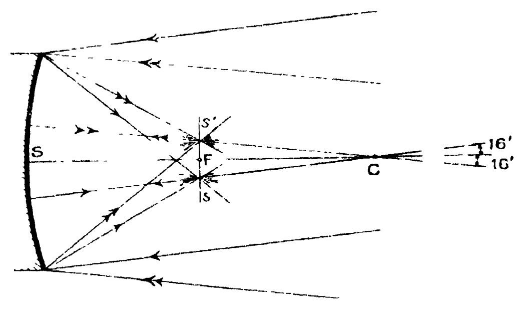


Fig. 21.

On constate qu'après réflexion les rayons lumineux convergent en avant du miroir, où ils forment, du Soleil, une image circulaire de diamètre ss', image dont les bords ne sont parfaitement nets que si l'on place le petit écran, destiné à la recevoir, dans un plan F perpendiculaire à l'axe principal (*fig.* 21), et à une distance du sommet S égale à la moitié du rayon de courbure. Ce plan, conjugué des points situés à l'infini, est appelé le *plan focal* du miroir, et la distance $SF = CF = \frac{R}{2} = f$ est la *distance focale.*

Puisque c'est seulement dans le plan focal que l'image du Soleil est parfaitement nette, c'est donc dans ce plan que viennent exactement converger, après leur réflexion, les différents faisceaux cylin-

driques émanant des divers points du Soleil. Le point de convergence s d'un faisceau se trouve évidemment à l'intersection du plan focal et de l'axe secondaire Cs du faisceau, puisque cet axe se réfléchit sur lui-même (28). — Réciproquement, le plan focal est le lieu des positions qu'il faut donner à des points lumineux pour que, après réflexion, les cônes de rayons qu'ils envoient sur le miroir soient transformés en faisceaux cylindriques, dont la direction est celle de l'axe secondaire du faisceau conique correspondant.

Le point d'intersection F du plan focal et de l'axe principal s'appelle le *foyer principal* du miroir : c'est le point de convergence de tous les rayons parallèles à l'axe principal. — Si l'axe principal passe par le centre du Soleil, ce point F est le centre de l'image solaire. Le bord inférieur s de cette image (*fig.* 21) est le point de convergence des rayons (marqués d'une flèche simple) partis du bord supérieur du Soleil, dont la direction fait un angle de 16 minutes avec l'axe principal (cet angle a été fortement exagéré sur la figure, pour le rendre visible). De même, le bord supérieur s' de l'image solaire est le point de convergence des rayons (marqués d'une flèche double) partis du bord inférieur du Soleil, et dont la direction fait également un angle de 16 minutes avec l'axe principal. L'image ss' est donc *renversée*. — Si l'on ne dispose pas du Soleil pour déterminer le plan focal, on peut se servir d'une bougie, que l'on placera le plus loin possible. Le plan de l'image sera très sensiblement le plan focal.

Calcul des dimensions de l'image du Soleil. — Calculons le diamètre ss', pour nous rendre compte des dimensions de l'image solaire dans un miroir concave. En assimilant ss' à un petit arc de cercle décrit de C comme centre avec CF ou $\frac{R}{2}$ comme rayon et correspondant à un angle de 32′, dont la mesure en radian est α, on sait que l'on a

$$\alpha = \frac{ss'}{\left(\frac{R}{2}\right)}, \quad \text{d'où} \quad ss' = \frac{R}{2} \times \alpha.$$

Or

$$\frac{\alpha}{\pi} = \frac{32'}{(180 \times 60)'}$$

d'où

$$\alpha = \frac{32 \times \pi}{180 \times 60} = \frac{2\pi}{45 \times 15} = 0{,}009 \text{ radian},$$

c'est-à-dire sensiblement 0,01 radian.

Donc

$$ss' = \frac{R}{2} \times 0{,}01 = \frac{R}{200} = \frac{f}{100}.$$

L'image du Soleil a donc pour diamètre la 100e partie de la dis-

tance focale. Si le miroir a par exemple 2 m de rayon ou 1 m de distance focale, $ss' = 1$ cm. Si le miroir a 20 m de rayon, $ss' = 1$ dm.

30. ***Positions et grandeurs relatives de l'image et de l'objet dans des plans conjugués en général.*** — Pour achever l'étude expérimentale des miroirs sphériques concaves, il nous reste à examiner ce

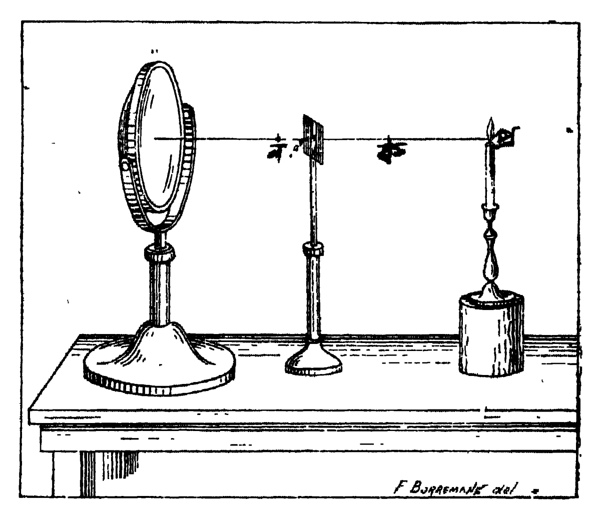


Fig. 22.

qui se passe lorsqu'on donne à l'objet lumineux, la flamme d'une bougie par exemple, toutes les positions possibles le long de l'axe du miroir, soit au delà du centre, soit entre le centre et le foyer, soit entre le foyer et le sommet.

1° La bougie P étant d'abord placée *au delà du centre* C, très loin du miroir (*fig.* 22), l'image P' se forme très près du foyer principal F, très près donc du *plan focal* F, dans lequel se fait l'image du Soleil (29); cette image réelle de la bougie est renversée et très petite. — Si l'on rapproche graduellement la bougie du centre C, l'image s'en rapproche en sens inverse; elle grandit, mais en restant toujours plus petite que l'objet. — Lorsqu'on atteint le centre, on a déjà vu (28) que l'image réelle, toujours renversée, se trouve à la même distance du miroir, et qu'elle est égale en grandeur à l'objet.

2° Quand la bougie P arrive *entre le centre* C *et le foyer* F (*fig.* 23), l'image P' se forme au delà du centre C; elle est encore renversée, mais plus grande que l'objet; elle est d'autant plus grande

et d'autant plus éloignée du miroir, que la flamme se rapproche

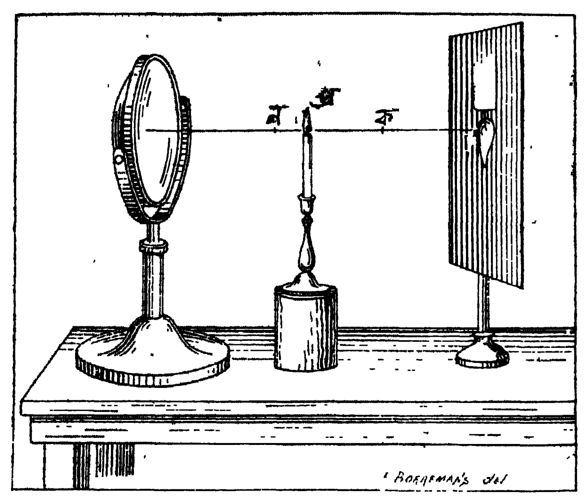


Fig. 23.

davantage du foyer principal. En particulier, lorsque le plan P se trouve où était le plan P′ dans l'expérience précédente, on constate que le plan P′ se trouve où était primitivement le plan P. Les plans conjugués sont donc *réciproques*. — Quand la bougie atteint le foyer principal, l'image disparaît; les rayons issus de chacun des points de la flamme forment, après réflexion, un faisceau parallèle.

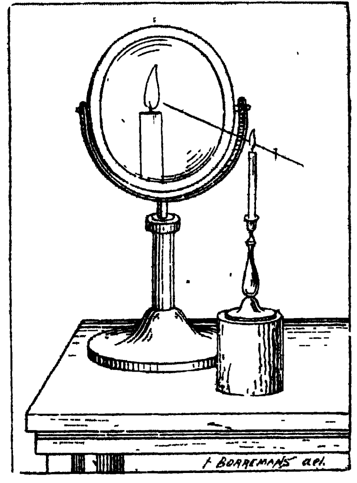


Fig. 24.

3° Quand la bougie P arrive *entre le foyer* F *et le miroir* M (*fig.* 24), un observateur placé en avant du miroir voit apparaître, derrière le miroir, une image virtuelle P′, droite et agrandie; cette image, d'abord très grande et très éloignée, se rapproche et diminue progressivement, à mesure qu'on approche la bougie de la surface du

miroir. A la limite, lorsque l'objet est contre le miroir, l'image virtuelle y est aussi, et elle est égale à l'objet, exactement comme dans le cas d'un miroir plan. — Cette expérience explique l'usage qu'on fait des miroirs sphériques concaves, comme *miroirs grossissants.*

4° On réaliserait enfin la disposition d'un *objet lumineux virtuel, situé derrière le miroir*, en employant un miroir concave auxiliaire (ou une lentille), donnant une image réelle de la bougie, et en plaçant le miroir M sur le trajet des rayons réfléchis par ce miroir (ou cette lentille) auxiliaire, de manière à empêcher la formation de cette image, qui joue ainsi, par rapport au miroir M, le rôle d'un objet virtuel. On obtient alors une *image réelle, droite par rapport à l'objet virtuel, plus petite que lui, et située entre le sommet et le foyer principal du miroir.*

Tous ces résultats se résument dans le tableau suivant, où C, F, et S désignent le centre, le foyer et le sommet du miroir :

OBJET	IMAGE
Objet réel, de ∞ en avant, à C. . .	Image réelle, de F à C, renversée, plus petite que l'objet.
Objet réel, de C à F. . .	Image réelle, de C à ∞ en avant, renversée, plus grande que l'objet.
Objet réel, de F à S.	Image virtuelle, de ∞ en arrière à S, droite, plus grande que l'objet.
Objet virtuel, de S à ∞ en arrière.	Image réelle de S à F, droite, plus petite que l'objet

On voit ainsi que, lorsque l'objet a parcouru tout l'axe principal, de l'infini en avant à l'infini en arrière, l'image a aussi parcouru tout l'axe, marchant *en sens contraire de l'objet*, depuis le foyer principal F jusqu'à l'infini en avant du miroir, pour revenir de l'infini en arrière à son point de départ F. — Les plans de rencontre de l'image et de l'objet sont : le plan du centre, où l'image réelle est égale à l'objet et renversée, et le plan du sommet, où l'image virtuelle est égale à l'objet et droite. Ces plans sont donc à eux-mêmes leurs propres conjugués.

31. ***Observation des images réelles, sans l'emploi d'écrans. — Images aériennes.*** — Dans les expériences précédentes, pour constater la production d'une image réelle, nous avons employé un écran, que nous placions au point où l'image apparaissait avec le plus de netteté : elle était alors *visible de tous les points de l'espace environnant*, parce que les points de l'écran qui étaient éclairés diffusaient de la lumière dans toutes les directions.

On peut encore percevoir la formation d'une image *réelle*, sans employer d'écran. En effet, les rayons émis par un point A de l'objet (*fig.* 25) donnent naissance, après réflexion, à un cône de rayons convergents, ayant pour base le miroir et pour sommet le point A' :

donc, si l'on supprime l'écran, ces rayons, continuant leur marche au delà de A', formeront un cône de rayons *divergents*, dont les génératrices seront dans le prolongement de celles du cône précédent. Dès lors, *si l'œil de l'observateur est placé à l'intérieur de ce dernier cône*, il recevra de la lumière dans les mêmes conditions que si le point A' appartenait à un objet lumineux. L'observateur verra de même les autres points de l'image, pourvu que son œil soit placé

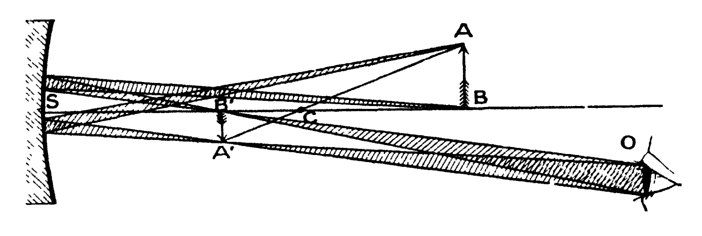


Fig. 25.

dans la région commune aux divers cônes ayant ces points pour sommets. — Cette région est généralement assez étendue pour que plusieurs observateurs puissent voir simultanément l'image, en se plaçant suffisamment loin. La figure 25 indique la marche des pinceaux lumineux, apportant à l'œil la sensation de l'image réelle A'B'.

Il est intéressant d'observer la formation de ces *images aériennes*. Elles offrent absolument l'aspect d'objets lumineux, plus brillants que les mêmes images observées sur des écrans diffusants, car leur lumière n'est pas diffusée en tout sens, mais elles ne sont visibles que *pour des positions déterminées de l'œil* (*).

Nous verrons que les images aériennes jouent un rôle essentiel dans la plupart des instruments d'optique.

32. ***Construction géométrique des images et marche des rayons lumineux.*** — La connaissance des propriétés expérimentales qui précèdent, propriétés du centre et du foyer principal, ainsi que l'existence des plans conjugués, vont nous permettre de construire géométriquement l'image d'un objet dans tous les cas possibles, en ne faisant usage que de la *règle* et de l'*équerre*.

1° Considérons d'abord un objet *situé au delà du centre*, par exemple une petite droite AB (*fig.* 26) perpendiculaire à l'axe prin-

(*) L'expérience dite *du bouquet magique* consiste précisément à placer, au voisinage du centre d'un miroir concave, un bouquet renversé, caché par un écran à l'œil de l'observateur. — Si l'observateur est convenablement placé, il aperçoit l'image aérienne du bouquet, symétrique de l'objet par rapport à l'axe principal, c'est-à-dire redressée : cette image apparaît au-dessus d'un vase, disposé à dessein au-dessus du bouquet lui-même, et donne à l'œil l'illusion parfaite d'un bouquet réel.

cipal. L'image est située dans le plan conjugué; pour l'obtenir, il suffira donc de déterminer le point A', image du point A. Ce point A' est d'abord sur l'axe secondaire ACH. Comme second rayon de construction, on peut employer le rayon AI parallèle à l'axe principal : après réflexion, ce rayon passe au foyer principal F; il déter-

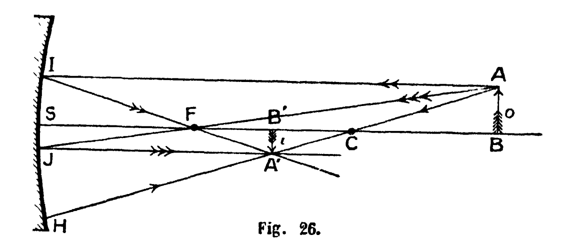


Fig. 26.

mine le point A' par sa rencontre avec AC. — Comme second rayon destiné à déterminer A', on aurait également pu choisir le rayon AF qui rencontre le miroir en J et devient, après réflexion, parallèle à l'axe principal. — Deux quelconques de ces trois rayons pourront donc servir de rayons de construction.

Par exemple, dans la figure 27, la construction a été faite au moyen de l'axe secondaire ACH et du rayon AI parallèle à l'axe principal.

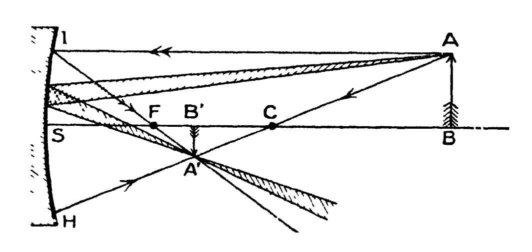


Fig. 27.

On trouve par cette construction, si elle est faite soigneusement, que, conformément à l'expérience (30, 1°), dans le cas où l'objet est placé au delà du centre, l'image, située entre le centre et le foyer principal, est plus petite que l'objet. Dans la figure 27, un pinceau lumineux, marqué par des hachures, indique en plus la marche des rayons lumineux.

Si l'objet AB *se rapproche du centre*, l'axe secondaire AC s'écarte de l'axe principal; or, le foyer conjugué A' du point A

est toujours déterminé par l'intersection de cet axe avec le rayon réfléchi IF; dès lors, l'image *grandit*, tout en restant *plus petite que l'objet*, et se rapproche du centre.

2° Si, dans la figure 27, c'est l'objet qui est supposé placé en A'B' *entre le centre et le foyer principal*, on trouvera, en répétant la construction géométrique, que l'image est située en AB, *au delà du centre*; qu'elle est *réelle*, *renversée* par rapport à l'objet, et *plus grande que l'objet*. — On verra facilement que, plus l'objet s'approche du foyer, plus cette image grandit, et s'éloigne du miroir. — Si l'objet AB coupe l'axe principal au *foyer principal* F, c'est-à-dire s'il est dans le *plan focal* (*fig.* 28), l'axe secondaire CAH du

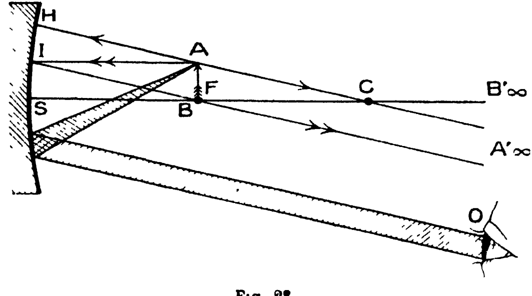


Fig. 28.

point A et le rayon réfléchi IF doivent être considérés comme parallèles, pourvu que l'ouverture du miroir soit très petite : en effet, AI devient alors égal à SF, et par suite à FC; la figure AIFC est donc un parallélogramme. Il en résulte que IF, qui, par son intersection avec AC, devait déterminer le foyer conjugué du point A, ne rencontre AC ni en avant ni en arrière du miroir. Dans ce cas il n'y a donc *pas d'image à distance finie* (*).

3° Supposons que l'objet AB soit situé *entre le foyer principal et le miroir* (*fig.* 29). En menant encore l'axe secondaire CAH du point A, et le rayon AI qui émane de ce point parallèlement à l'axe principal et se réfléchit suivant IF, on forme un trapèze AIFC, dans lequel le côté AI est plus petit que FC, puisqu'il est plus petit que SF : le rayon réfléchi IF, dirigé en avant du miroir, ne rencontre donc

(*) En considérant cette position de l'objet comme la limite des positions qu'il peut prendre lorsqu'il s'approche indéfiniment du foyer principal, on dit que l'image est alors *infiniment éloignée du miroir* et *infiniment agrandie*. — Une telle image est cependant visible, pour l'œil placé en O (fig. 28) qui reçoit les faisceaux parallèles de rayons réfléchis, dans les mêmes conditions qu'il reçoit les faisceaux solaires.

pas l'axe secondaire du point A. Mais les prolongements de ces deux directions se rencontrent derrière le miroir, en un point A', qui est le foyer conjugué *virtuel* du point A. Un pinceau lumineux, marqué par des hachures sur la figure, indique la marche des rayons. Il est d'ailleurs bon de s'habituer, dans ces constructions, à tracer en pointillé, comme on l'a fait, les prolongements géométriques des rayons, et à ne tracer en traits pleins que les rayons eux-mêmes. On voit donc que, dans ce cas, conformément à l'expérience (30, 3°), l'image est *virtuelle*, *droite* et *plus grande que l'objet.* — A mesure que l'objet se rapproche du miroir, l'image s'en rapproche également, et diminue de grandeur.

4° Enfin, pour un *objet virtuel* qui serait placé en A'B' (*fig.* 29), on aurait réciproquement, par la construction géométrique, une

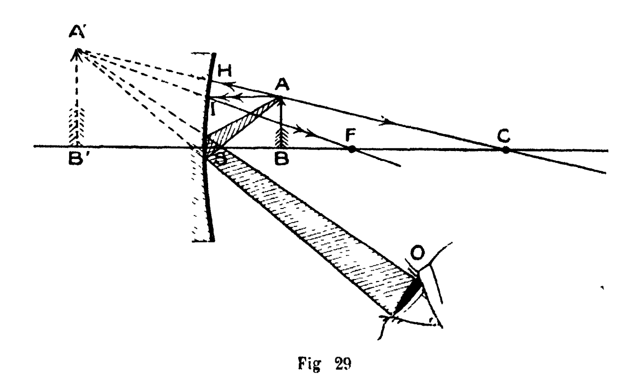


Fig 29

image AB, réelle, droite, plus petite que l'objet, et placée entre le sommet et le foyer principal, ainsi que l'indique l'expérience (30, 4°).

33. ***Application des miroirs sphériques concaves à la mesure des petits angles de déviation.*** — On utilise la propriété qu'ont les points situés dans le voisinage du centre d'un miroir sphérique concave d'avoir une image symétrique par rapport au centre, pour mesurer, en Électricité, les petits angles de déviation des aiguilles des électromètres ou des cadres de galvanomètres. Ces aiguilles sont suspendues à des fils verticaux, servant d'axes de rotation. On applique alors, contre la tige verticale qui supporte l'aiguille, un petit miroir sphérique concave, ayant un assez grand rayon de courbure, 1 m, par exemple. Dans le plan perpendiculaire à l'axe principal, et passant par le centre de courbure, on dispose une fenêtre, vivement éclairée, au travers de laquelle est tendu un fil vertical. Le prolongement de ce fil passe par le centre du miroir

dans sa position habituelle d'équilibre, de sorte que, si l'on prend comme plan de la figure 30 le plan horizontal de section principale du miroir, le fil f se projette alors au centre, ainsi que son image, située dans le prolongement du fil lui-même.

Lorsque le miroir tourne d'un *petit* angle α et que l'axe principal tourne horizontalement du même angle, le fil reste en f (*fig.* 30), pendant que le centre vient en un point C situé sensiblement sur la perpendiculaire f C à Sf; l'image du fil se fait alors en f', symétrique de f par rapport à C. Le déplacement ff' de l'image se mesure sur une règle divisée; l'angle correspondant à ce déplacement ff' est égal à 2α. Comme cet angle est généralement assez petit pour qu'on puisse assimiler ff' à un arc de cercle décrit du sommet du miroir comme centre, avec le rayon de courbure R, on a, pour l'angle α mesuré en radians,

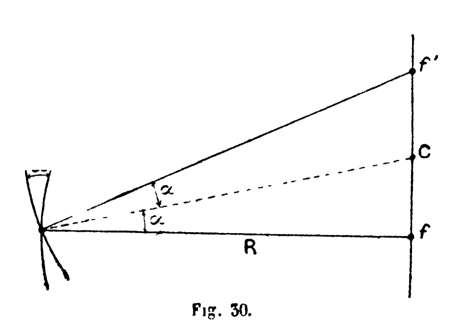


Fig. 30.

$$\alpha = \frac{Cf}{R} = \frac{ff'}{2R}$$

On obtiendra, par suite, le nombre n de secondes d'angle correspondant, en multipliant ce nombre α par le nombre de secondes compris dans le radian, c'est-à-dire $\frac{360 \times 60 \times 60}{2\pi}$ ou 206 265.

$$n'' = \frac{ff'}{2R} \times 206\,265.$$

La figure 31 indique le détail du dispositif expérimental. Le fil f est disposé un peu au-dessous du centre de courbure du miroir, et la règle divisée est placée un peu au-dessus. On éclaire la fenêtre au moyen d'un miroir plan auxiliaire, et d'une lampe placée latéralement. L'image de la fenêtre se fait sur la règle; au milieu de cette image brillante, le fil se détache en noir sur les traits de division. Au lieu d'un fil noir tendu sur une fenêtre éclairée, on emploie, plus simplement, le filament d'une lampe électrique à incandescence ordinaire, ou mieux d'une lampe Nernst; l'image très brillante du filament se produit sur la règle divisée translucide, et l'observation de la déviation peut se faire en plein jour. Si l'on veut projeter la déviation sur un écran, où elle sera rendue

plus visible encore que sur la règle, on supprime la règle, on rapproche le fil f du miroir de façon à le mettre entre le centre et le

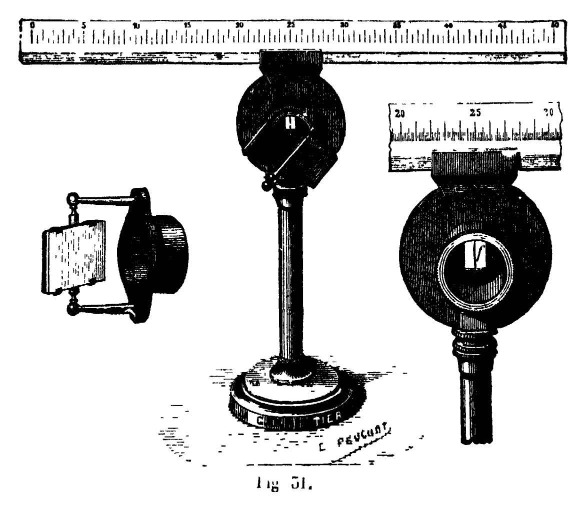


Fig. 31.

foyer principal, et l'on s'arrange pour obtenir sur l'écran de projection une image agrandie de la fenêtre, parfaitement au point.

34. ***Miroirs sphériques convexes.*** — Les miroirs sphériques convexes sont beaucoup moins importants, dans la pratique, que les miroirs sphériques concaves. Tous les résultats relatifs à ces miroirs peuvent se déduire des résultats correspondants, fournis par les miroirs concaves.

Fig 32

Il est facile de voir, par exemple, qu'il existe dans les miroirs convexes un *foyer principal virtuel*, situé à égale distance du sommet et du centre. — En effet, considérons un rayon PI (*fig.* 32) parallèle à l'axe principal, et menons la normale CIN au point d'incidence. L'angle d'incidence de ce rayon est le même que celui du rayon qui arriverait, suivant la même direction, mais en sens opposé, sur le même miroir utilisé comme miroir concave. Il en résulte que

les rayons réfléchis, dans les deux cas, doivent être situés dans le prolongement l'un de l'autre. Le rayon réfléchi sur le miroir convexe a donc bien son prolongement passant par le milieu F de l'intervalle CS.

La construction géométrique des images, que nous avons donnée pour les miroirs concaves, s'applique également de tout point aux

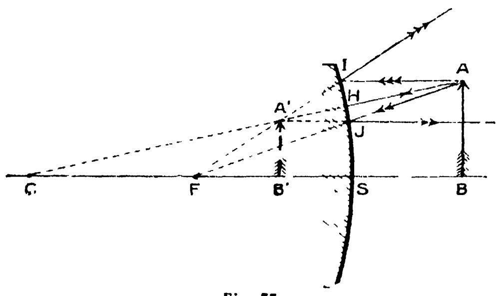


Fig. 33.

miroirs convexes. Par exemple, si l'on considère le seul cas intéressant, celui d'un objet réel AB (*fig.* 33), on obtient, au moyen des rayons habituels de construction, une image virtuelle A'B', *droite, plus petite que l'objet, et située entre le foyer principal* F *et le sommet* S. Cette construction n'est, en effet, que la réciproque de celle à laquelle donnerait lieu un objet virtuel AB, par rapport au même miroir qui serait réfléchissant sur sa face concave; l'image serait A'B', image réelle.

35. ***Détermination expérimentale de la distance focale principale d'un miroir sphérique concave.*** — On obtient immédiatement la distance focale principale d'un miroir sphérique concave, en orientant ce miroir de façon que son axe principal soit dirigé vers un point lumineux très éloigné, par exemple vers le centre du Soleil (*fig.* 21). On cherche, à l'aide d'un petit écran, l'endroit où l'image du Soleil se forme avec le plus de netteté; on obtient ainsi le plan focal, dont il ne reste plus qu'à mesurer la distance au sommet du miroir. — Le double de la distance focale ainsi trouvée est le rayon du miroir.



Fig. 34.

On peut également utiliser la propriété du plan du centre, de fournir une image égale à l'objet, dans le même plan (*fig.* 20). On cherche l'image d'une série de traits équidistants, tracés sur une feuille de papier que l'on a pliée en deux perpendiculairement aux traits (*fig.* 34), et que l'on déplace jusqu'à ce que les traits de l'image aérienne soient bien au point,

dans le prolongement de ceux de l'objet. La distance de l'objet au miroir est alors égale au rayon de courbure.

III. — Miroirs sphériques : étude théorique. Formules des miroirs sphériques.

36. ***Étude théorique des miroirs sphériques.*** — Au lieu d'envisager le problème des miroirs comme purement expérimental, on peut le traiter *à priori* en s'appuyant sur les lois de la réflexion (19) et sur les théorèmes de la géométrie ; on est ainsi conduit à des équations qui définissent algébriquement la position et la grandeur de l'image en fonction de la position et de la grandeur de l'objet, et du rayon de courbure du miroir.

Sous sa forme la plus générale, le problème à résoudre est le suivant :

Un objet lumineux donné est placé devant un miroir sphérique :

1° *A quelles conditions cet objet admet-il une image?*

2° *Déterminer la position et la grandeur de cette image.*

Traitons d'abord le problème dans le cas simple où l'objet lumineux se réduit à *un point*.

37. ***Réflexion d'un faisceau conique sur un miroir sphérique.*** — Soit M un miroir sphérique concave (*fig.* 35) de centre C, et P un point lumineux placé devant ce miroir, joignons PC; cette droite est *l'axe secondaire du point* P (25). Parmi tous les rayons partis de P, l'un se propage suivant PC, il rencontre le miroir au point S et se réfléchit sur lui-même. Envisageons un autre rayon incident quelconque PI, il se réfléchit en I dans le plan d'incidence PIC, en faisant avec la normale CI, un angle CIP′ égal à l'angle d'incidence PIC (19). Déterminons la position du point P′ où ce rayon réfléchi coupe le rayon réfléchi SC; à cet effet, menons dans le plan d'incidence PIC, la droite IJ, perpendiculaire à CI; les deux droites CI et IJ sont les bissectrices intérieure et extérieure de l'angle en I du triangle PIP′; elles

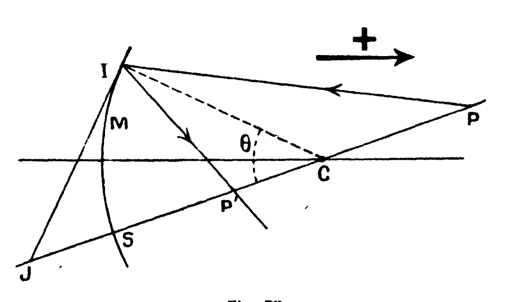


Fig. 35.

déterminent donc sur la base de ce triangle deux points C et J qui forment avec P et P′ une division harmonique (*) ; les quatre segments $\overline{CP}$, $\overline{CP'}$ $\overline{JP}$ et $\overline{JP'}$ sont donc liés par la relation générale :

$$(1) \qquad \frac{\overline{CP}}{\overline{CP'}} = -\frac{\overline{JP}}{\overline{JP'}},$$

qui, par une transformation connue (**) donne :

$$(2) \qquad \frac{1}{\overline{JP}} + \frac{1}{\overline{JP'}} = \frac{2}{\overline{JC}}$$

Cette équation (2) nous montre que la position du point P′, où le rayon réfléchi IP′ coupe l'axe CP, dépend de la position du point J, et par suite de l'angle ICI = θ, c'est-à-dire de l'ouverture du miroir correspondant au point I d'incidence du rayon PI considéré; donc chaque rayon incident différent de PI donnera un point P′ différent; donc *les divers rayons réfléchis tels que* IP′ *ne viennent pas passer par un même point;* par suite, dans le cas général, la réflexion d'un faisceau conique sur un miroir sphérique ne transforme pas ce faisceau sur un autre faisceau conique; en d'autres termes, *dans le cas général, un miroir sphérique ne donne pas d'image du point lumineux* P. On dit pour exprimer ce fait que la surface sphérique n'est pas *stigmatique* par réflexion (du grec *stigma*, point).

38. ***Cas particuliers de stigmatisme d'un miroir sphérique.*** — Toutefois le miroir peut être stigmatique dans certains cas particuliers; nous allons examiner deux de ces cas :

1° Le point P est en C, au centre du miroir, alors dans l'équation (2), $\overline{JP} = \overline{JC}$: il en résulte $\overline{JP'} = \overline{JC}$; donc le point P′ est aussi en C : *la surface sphérique est rigoureusement stigmatique pour son centre.* Ce résultat était facile à prévoir.

2° *L'angle* θ (*fig.* 35) *reste très voisin de zéro pour tous les rayons incidents.* Dans ce cas, pour tous les rayons incidents, le point I sera tres voisin du point S, et, par suite, le point J restera lui-même tellement voisin de S que l'on pourra négliger JC *qui est beaucoup plus petit que* IS (***). On pourra alors confondre JC avec

(*) Cours de Géométrie de Seconde C et D.

(**) Il suffit de poser, en appliquant le théorème des segments :

$$\overline{JP} = \overline{JC} + \overline{CP};$$

et de même

$$\overline{JP'} = \overline{JC} + \overline{CP'},$$

et de se rappeler que $\qquad \overline{CJ} = -\overline{JC}.$

(***) On peut démontrer sans peine que JS est sensiblement égal à la moitié du

SC; en effet, on a, dans tous les cas, en appliquant le théorème des segments :

$$\overline{JS} + \overline{SC} = \overline{JC}$$

d'où

$$\overline{JS} = \overline{JC} - \overline{SC}$$

ou

$$\overline{JS} = \frac{\overline{IC}}{\cos\theta} - \overline{SC} = \overline{SC}\left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right),$$

puisque

$$\overline{IC} = \overline{SC}.$$

Mais lorsqu'on fait varier un angle θ au voisinage de 0° (par exemple entre − 3° et + 3°), les variations de $\cos\theta$ sont beaucoup plus petites que les variations de l'angle, et l'on peut dire que dans cet intervalle $\cos\theta$ reste *constant* et *égal à l'unité;* par suite $\overline{JS}$ pourra être considéré comme égal à zéro (*).

Si alors, nous supposons confondus les points J et S, l'équation (2) du paragraphe précédent devient :

$$\frac{1}{\overline{SP}} + \frac{1}{\overline{SP'}} = \frac{2}{\overline{SC}}.$$

Si donc le point P est donné, comme les points S et C sont des points fixes également donnés, cette équation détermine pour P′ une position fixe, indépendante du rayon incident choisi. Tous les rayons réfléchis iront donc passer par le même point P′ qui sera alors l'image du point P.

On peut donc énoncer le théorème suivant :

Théorème. — *Si un faisceau lumineux conique parti d'un point P n'intercepte sur un miroir sphérique de centre C qu'une portion de très faible ouverture au voisinage du point* S *où l'axe* PC *du point* P *perce le miroir, le faisceau réfléchi est également conique; le point* P′, *sommet du faisceau réfléchi, est alors l'image*

carré de IS, en prenant le rayon SC comme unité; si donc l'arc IS est de l'ordre de 0,01, JS sera plus petit que 0,0001.

(*) Cela tient en somme à ce que $\cos\theta$ est maximum pour $\theta = 0°$. Voici d'ailleurs les valeurs numériques de $\frac{1}{\cos\theta} - 1$ pour quelques valeurs de θ.

Valeurs de θ.	Valeur de $\left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right)$
0°	0,0000
1°	0,0002
2°	0,0006
3°	0,0014

On voit que, pour θ = 3°, JS n'est guère que la millième partie du rayon SC du miroir, et par suite est vraiment négligeable.

du point P. *De plus, les segments* $\overline{SP}$, $\overline{SP'}$ *et* $\overline{SC}$ *sont liés par la relation harmonique :*

$$(3) \qquad \frac{1}{\overline{SP}} + \frac{1}{\overline{SP'}} = \frac{2}{\overline{SC}}$$

Un faisceau conique de rayons, satisfaisant à ces conditions, a reçu le nom de *faisceau de rayons centraux*.

39. ***Généralité de la formule des miroirs sphériques***. — La formule précédente est tout à fait générale, comme la relation harmonique d'où l'on est parti, à condition d'envisager les longueurs SP, SP′ et SC comme des *segments susceptibles de signes fixés par une convention.*

Convention de signes. — Le point S *étant pris pour origine, les segments seront considérés comme* **positifs** *quand, pour aller de* S *à l'autre bout du segment, il faudra se déplacer dans le sens de propagation de la lumière* **réfléchie** *par le miroir; ils seront négatifs dans le cas contraire.*

Par exemple, dans la figure 35, les trois segments $\overline{SP}$, $\overline{SP'}$, $\overline{SC}$ sont tous les trois positifs.

Moyennant cette convention, la formule est applicable quelles que soient les positions relatives des points P, P′, S, C; en particulier, elle conviendra aussi aux *miroirs sphériques convexes*.

40. ***Cas d'un objet lumineux***. — ***Plans conjugués***. — Un objet lumineux doit être envisagé comme un ensemble de points lumineux, si donc les conditions de stigmatisme énoncées dans le théoreme précédent (38,2°) sont satisfaites pour tous les points de l'objet, à chaque point objet correspondra un point image, et l'objet lui-même aura une image dans le miroir sphérique.

Dans le cas général cette image ne sera pas semblable à l'objet;

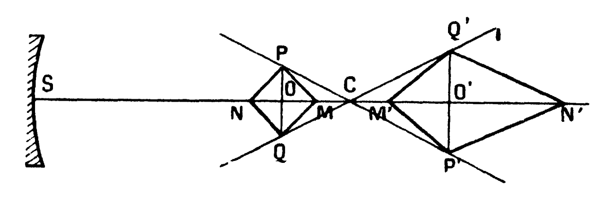


Fig. 36.

elle sera plus ou moins déformée : la figure 36 représente l'image M′N′P′Q′ qu'un miroir sphérique S de centre C donne des quatre

sommets d'un carré MNPQ considéré comme objet lumineux; on voit combien peu l'image ressemble à l'objet.

Une image n'est *utilisable* que si elle est *semblable à l'objet*, le problème à résoudre est donc le suivant :

Un objet lumineux placé devant un miroir sphérique est dans des conditions telles qu'il a une image; à quelles conditions particulières doit-il satisfaire pour que l'image soit géométriquement semblable à l'objet?

Nous ne traiterons pas directement cette question telle qu'elle est posée; nous nous bornerons à établir le théorème suivant :

Théorème. — *Si un petit objet plan, placé devant un miroir sphérique, a ses différents points très voisins du pied* P *de la perpendiculaire menée du centre* C *du miroir sur le plan de l'objet (axe secondaire de l'objet), et que la condition de stigmatisme* (38,2°) *soit satisfaite pour tous ces points, le miroir donne de cet objet une image plane, homothétique de l'objet par rapport au centre du miroir; les distances* $\overline{SP}$ *et* $\overline{SP'}$ *du point* S, *où l'axe* CP *rencontre le miroir, à l'objet et à son image sont liées par la relation :*

$$(1) \qquad \frac{1}{\overline{SP}} + \frac{1}{\overline{SP'}} = \frac{2}{\overline{SC}},$$

et le rapport d'homothétie γ *a pour valeur, en grandeur et en signe* (*)

$$(2) \qquad \gamma = \frac{\textit{image}}{\textit{objet}} = -\frac{\overline{SP'}}{\overline{SP}}.$$

Soit, en effet, un miroir sphérique de centre C (*fig.* 37) dont

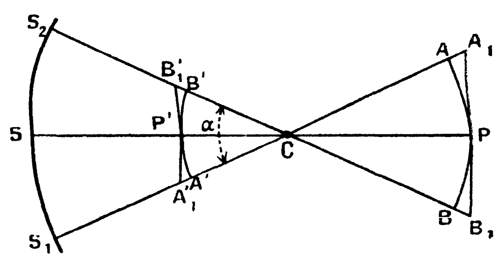


Fig. 37.

l'ouverture $\alpha = S_1CS_2$ est suffisamment faible, décrivons de C comme centre une calotte sphérique APB.

(*) Nous admettons, comme en géométrie, que si l'homothétie est *directe*, le rapport d'homothétie est *positif*, et qu'il est *negatif* si l'homothétie est *inverse*.

Si les rayons envoyés par A sur le miroir forment un faisceau de rayons centraux (38,2°), le point A admettra une image A′ située sur AC, et telle que

$$\frac{1}{\overline{S_1A}}+\frac{1}{\overline{S_1A'}}=\frac{2}{\overline{S_1C}};$$

considérons maintenant un autre point B de la sphère APB, pour que la condition de stigmatisme soit satisfaite à la fois pour A et pour B il faut que les points A et B soient tous les deux dans le cône d'ouverture, et par suite que l'angle ACB soit lui-même très petit, sinon l'un au moins des deux faisceaux partis de A ou de B ne serait plus un faisceau de rayons centraux; dans ces conditions, le point B aura également une image B′ telle que

$$\frac{1}{\overline{S_2B}}+\frac{1}{\overline{S_2B'}}=\frac{2}{\overline{S_2C}};$$

mais $\overline{S_1A}=\overline{S_2B}$, et $\overline{S_1C}=\overline{S_2C}$, donc $\overline{S_1A'}=\overline{S_2B'}$ Il en sera de même pour tous les points de la calotte sphérique APB; et l'on voit que *les points lumineux situés sur la calotte sphérique de faible ouverture* APB *auront pour image des points situés sur une autre calotte sphérique* A′P′B′ *de même ouverture angulaire que* APB. On voit d'ailleurs immédiatement sur la figure que si, comme en pratique, le miroir a lui-même la forme d'une calotte sphérique, la position la plus favorable au stigmatisme pour la calotte sphérique objet APB, sera celle pour laquelle *le pôle* P *de cette calotte est situé sur l'axe principal du miroir* (25).

Soient alors P et P′ les sommets des deux calottes sphériques considérées, comme elles ont des ouvertures vraiment petites, on peut les remplacer par les plans tangents A_1PB_1 et $A'_1P'B'_1$ en leurs sommets; l'erreur commise en substituant A_1 à A et A'_1 à A′ sera du même ordre que celle qui nous a permis de confondre les deux points J et S (*fig.* 35), et on pourra dire que la figure plane A_1PB_1 a pour image la figure plane $A'_1P'B'_1$ qui lui est parallèle; de plus à chaque point objet A_1 correspond un point image A'_1 tel que la droite $A_1A'_1$ passe par un point fixe C, donc les deux figures sont homothétiques par rapport au point C, et l'on a

$$\gamma=\frac{image}{objet}=\frac{\overline{CP'}}{\overline{CP}};$$

mais les points P et P′ sont conjugués harmoniques par rapport aux points C et S, on a donc :

$$\frac{\overline{CP'}}{\overline{CP}}=-\frac{\overline{SP'}}{\overline{SP}},$$

par suite,

$$\gamma = -\frac{\overline{SP'}}{\overline{SP}}.$$

Mais P′ est l'image de P, donc

$$\frac{1}{\overline{SP}} + \frac{1}{\overline{SP'}} = \frac{2}{\overline{SC}}.$$

Le théorème proposé est donc établi.

Les plans A_1PB_1 et $A'_1P'B'_1$ sont des *plans conjugués.*

On simplifie habituellement les notations des équations précédentes (1) et (2) en représentant chacun des segments $\overline{SP}$, $\overline{SP'}$, $\overline{SC}$, par un symbole unique. Posons

$$\overline{SP} = p, \qquad \overline{SP'} = p' \quad \text{et} \quad \overline{SC} = R;$$

représentons par i une dimension de l'image et par o la dimension correspondante de l'objet, les deux équations que nous venons d'établir prennent la forme suivante :

(3) $$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{R}$$

(4) $$\gamma = \frac{i}{o} = -\frac{p'}{p}.$$

Le rapport d'homothétie γ s'appelle encore le *grandissement du miroir.*

Ces formules (3) et (4) sont tout à fait générales, comme l'équation harmonique d'où l'on est parti : le cas des miroirs concaves se distinguera de celui des miroirs convexes par le signe du nombre qui mesure le rayon R ; avec la convention de signes faite plus haut (39), il sera *positif* pour les miroirs *concaves*, et *négatif* pour les miroirs *convexes.*

Remarque. — On pose souvent $R = 2f$; par suite, le segment f est défini par

$$\overline{SF} = f = \frac{\overline{SC}}{2};$$

f s'appelle la *distance focale principale* du miroir ; l'équation (3) s'écrit alors

(3) $$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

41. ***Applications.*** — La discussion algébrique des équations (3) et

(4) du paragraphe précédent permet de retrouver facilement tous les faits auxquels l'étude expérimentale des miroirs nous a conduits; les résultats suivants sont immédiats :

$f > 0$ miroir concave,
$f < 0$ miroir convexe,
$p > 0$ objet réel,
$p < 0$ objet virtuel,
$p' > 0$ image réelle,
$p' < 0$ image virtuelle,
$\gamma > 0$ image droite,
$\gamma < 0$ image renversée.

Pour montrer une application des formules, nous allons résoudre deux problèmes.

1° *Où faut-il placer un objet devant un miroir concave de* 60 *cm de rayon pour en avoir une image droite double de l'objet?*

Le miroir étant concave, $R = +60$ cm, l'image doit être droite, donc γ est positif et par suite égal à $+2$; les équations du problème sont :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{60}$$

$$-\frac{p'}{p} = +2.$$

l'élimination de p' entre ces deux équations conduit à

$$p = 15 \text{ cm}.$$

Il en résulte $p' = -30$ cm; l'image sera virtuelle et située à 30 cm derrière le miroir (*fig.* 38).

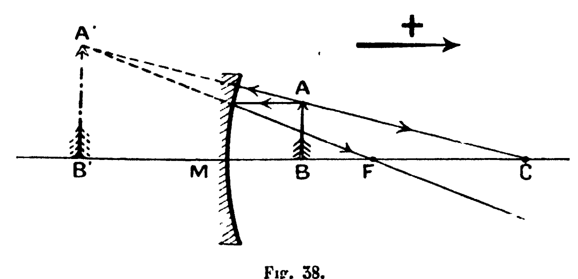


Fig. 38.

2° *On veut avoir d'un objet une image réelle droite et double de l'objet; quel miroir faut-il prendre et où faut-il que l'objet soit placé?*

L'image devant être droite et double de l'objet, on aura

$$\gamma = -\frac{p'}{p} = +2$$

d'où

$$p = -\frac{p'}{2};$$

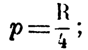
portons cette valeur dans l'équation des miroirs, il vient

$$\frac{1}{-\frac{p'}{2}} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{R};$$

d'où l'on tire

$$R = -2p'.$$

L'image devant être réelle, on a $p' > 0$, donc $R < 0$: le miroir est *convexe;* comme $p = -\frac{p'}{2}$, il en résulte



$$p = \frac{R}{4};$$

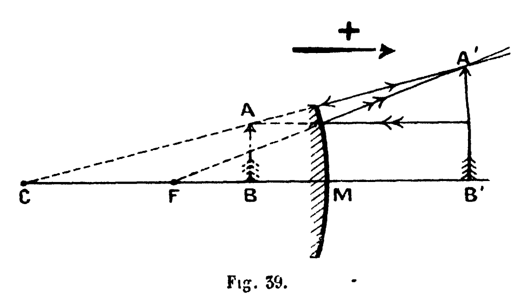


Fig. 39.

p est négatif comme R, donc l'*objet est virtuel.* La figure 39 montre ces résultats.

42. ***Formules de Newton*** (*). — On appelle *formules de Newton* les équations générales qu'on obtient en prenant comme origine des coordonnées le foyer principal, au lieu du sommet du miroir.

(*) Newton (1643-1727), illustre savant anglais, l'un des génies les plus puissants de tous les temps. Il fut à la fois mathématicien, astronome et physicien. En Mathématiques, il partage avec Leibniz la gloire de l'invention du ***calcul infinitésimal***. En Astronomie, on lui doit la découverte de la loi de la ***gravitation universelle***. Enfin, en Physique, il a laissé de nombreux travaux sur l'Optique, en particulier, l'étude de la *dispersion*.

Posons (*fig.* 40)

$$\overline{FB}=z, \qquad \overline{FB'}=z', \qquad \overline{FS}=-\overline{SF}=-f=\varphi;$$

convenons de regarder les segments z, z' et φ comme *positifs*,

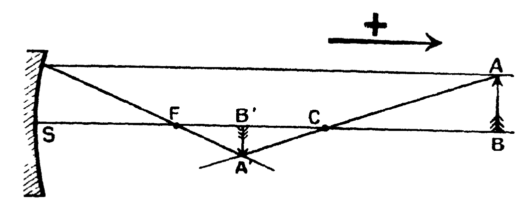


Fig. 40.

lorsque les points B, B' et S seront, par rapport à F, *du côté où va la lumière réfléchie;* comme *négatifs*, lorsqu'ils seront *de l'autre côté*.

Posons en outre,

$$AB=o, \qquad A'B'=i.$$

Le théorème fondamental des segments nous donne immédiatement les relations suivantes :

$$\overline{FB}+\overline{BS}=\overline{FS},$$
$$\overline{FB'}+\overline{B'S}=\overline{FS};$$

mais $\overline{FB}=z$, $\overline{BS}=-\overline{SB}=-p$ et $\overline{FS}=\varphi$; de même, $\overline{FB'}=z'$ et $\overline{B'S}=-\overline{SB'}=-p'$; par suite, les deux équations précédentes peuvent se mettre sous la forme

$$z-p=\varphi$$
$$z-p'=\varphi,$$

portons les valeurs de p et p' tirées de ces relations dans l'équation des miroirs, il vient, en tenant compte de l'égalité $\varphi=-f$;

$$\frac{1}{z-\varphi}+\frac{1}{z'-\varphi}=-\frac{1}{\varphi};$$

d'où, tous calculs faits,

(1) $$zz'=\varphi^2.$$

Calculons maintenant γ; on a immédiatement :

$$\frac{i}{o}=\gamma=-\frac{p'}{p}=-\frac{z'-\varphi}{z-\varphi};$$

mais $z'=\frac{\varphi^2}{z}$; par suite,

$$\gamma = -\frac{\frac{\varphi^2}{z}-\varphi}{z-\varphi} = -\frac{\varphi(\varphi-z)}{z(z-\varphi)},$$

ou, à cause de (1)

(2) $$\gamma=\frac{i}{o}=\frac{\varphi}{z}=\frac{z'}{\varphi}.$$

Ces formules (1) et (2), dites formules de Newton, sont aussi générales que celles qui ont servi à les établir; elles sont d'un emploi commode pour la solution d'un certain nombre de questions.

Il est bon de remarquer ici que, pour les objets réels, z est compris entre $+\infty$ et φ On voit donc que, pour un miroir concave, où φ est négatif, z peut être *négatif*, bien que l'objet reste *réel*. Il en est de même pour l'image lorsque z' est compris entre 0 et φ: cette abcisse *négative* correspond également au cas d'une image *réelle*.

CHAPITRE III

RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE

I. — Phénomènes fondamentaux.

43. ***Expériences de réfraction.*** — Lorsque des faisceaux de rayons lumineux arrivent à la surface de séparation de deux milieux transparents, comme l'air et l'eau, l'air et le verre, une partie des rayons se réfléchit et fait retour dans le premier milieu; mais une autre partie pénètre dans le second milieu, et subit le phénomène de la *réfraction* (du latin *refringere*, briser). Ce phénomène tire son nom du changement de direction éprouvé par les rayons, qui sont brisés par leur passage à travers la surface de séparation.

Le phénomène de la réfraction est mis en évidence par un certain nombre de faits d'observation ou d'expérience : nous allons en rappeler quelques-uns.

Chacun sait, par exemple, qu'un bâton mn (*fig.* 41), en partie plongé dans l'eau, paraît brisé au point p où il pénètre dans le liquide : la partie plongée pm apparaît en pm', relevée vers la surface. Or, nous savons, d'autre part, que l'œil, impressionné par des rayons lumineux reporte l'impression qu'il ressent, au point d'où ces rayons semblent émaner, réellement ou virtuellement.

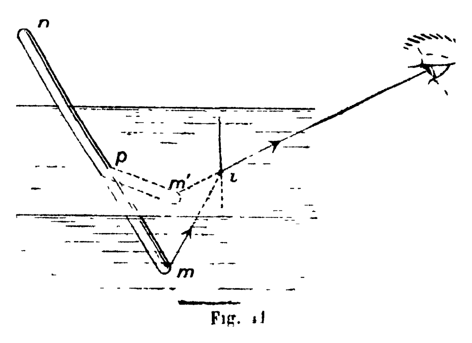


Fig. 41

L'observation du bâton brisé établit donc qu'un rayon tel que mi, en passant de l'eau dans l'air, éprouve un changement de direction qui l'écarte de la normale au point d'incidence : c'est

ce rayon, et les rayons voisins reçus par l'œil, qui lui donnent l'illusion de l'existence du point m', situé sur leurs prolongements.

Mettons de même un objet brillant quelconque, par exemple une pièce de monnaie m (*fig.* 42), sur le fond d'un vase à parois opaques V. Ce vase étant d'abord vide, plaçons notre œil en un point O, tel qu'il cesse juste d'apercevoir la pièce cachée par le bord du vase. Lorsqu'on verse de l'eau en quantité suffisante dans le vase, la pièce de monnaie devient visible tout entière pour l'œil resté en O; elle paraît relevée, ainsi que le fond du vase. C'est donc qu'un rayon tel que mr, qui, avant l'introduction de l'eau, passait bien au-dessus de l'œil, se trouve actuellement ramené dans l'œil, par une réfraction suivant la direction $m'r$O, plus écartée de la normale au point d'incidence. Cette expérience montre donc encore qu'un rayon lumineux s'écarte de la normale, lorsqu'il passe de l'eau dans l'air.

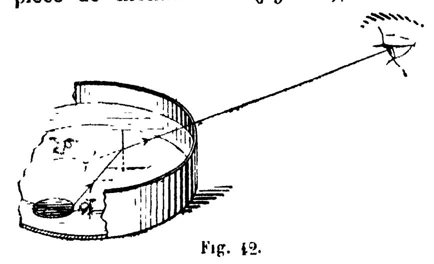


Fig. 42.

Il résulte de ces deux expériences que la réfraction change la direction des rayons lumineux : on peut le montrer par une expérience directe.

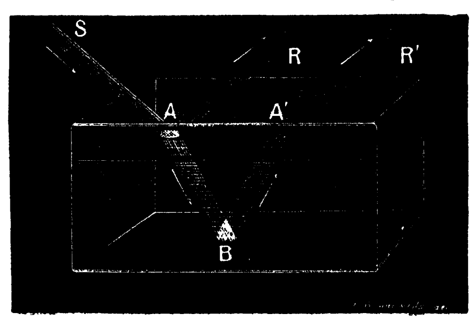


Fig. 43

Dans une chambre obscure, amenons un faisceau cylindrique de rayons venant du soleil ou d'un arc électrique, et faisons-le tomber suivant SA (*fig.* 43) sur une nappe d'eau contenue dans une cuve à parois de verre; grâce à l'illumination des poussières qui sont en suspension dans l'air et dans l'eau, on voit bien le trajet des rayons. Au point A, où le faisceau rencontre l'eau, une portion de la lumière se réfléchit suivant AR; l'autre portion, en pénétrant dans l'eau, l'illumine suivant une direction AB qui se rapproche de la verticale.

44. ***Lois de la réfraction. Indice de réfraction.*** — Établissons d'abord une distinction capitale, au point de vue de la réfraction, entre les divers corps homogènes.

Certains corps, tout en étant parfaitement homogènes, ne présentent pas les mêmes propriétés dans toutes les directions. Ainsi, chacun sait que le *bois* se fend plus facilement dans le sens des fibres, que perpendiculairement. De même, le *mica*, le *gypse*, se clivent, c'est-à-dire peuvent se séparer en lames parallèles extrêmement minces; la *résistance à la rupture* est donc moindre dans une direction parallèle à ces plans de clivage, que dans toute autre direction. On peut également constater que la *conductibilité pour la chaleur* est différente dans les diverses directions d'une de ces lames de gypse. Il suffit, pour cela, de recouvrir la lame d'une couche très mince de cire, et d'y appliquer, en un point, une pointe métallique chauffée (*fig.* 44); on constate que la cire fond sur une longueur variable suivant la direction. Aux points où s'arrête la fusion de la cire, il se forme un bourrelet, dont les points étaient tous à la température de la fusion de la cire. Or ce bourrelet affecte autour du point chauffé une forme elliptique AA'BB'. On donne à ces substances le nom de substances *anisotropes* (*a* privatif et *isotrope*, du grec *isos* égal, et *trépô* je tourne).

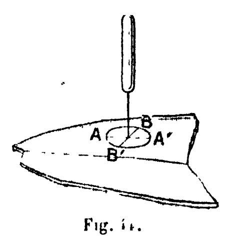


Fig. 44.

On donne, au contraire, le nom de substances *isotropes* aux substances homogènes, dont les propriétés sont identiques dans toutes les directions, comme l'eau, l'air, le verre. — Nous ne nous occuperons, dans ce qui va suivre, que des milieux transparents *isotropes*. Dans ce cas, un faisceau de rayons incidents ne donne naissance qu'à un seul faisceau de rayons réfractés; la réfraction est dite *simple*, par opposition à la *double réfraction* des corps anisotropes, que nous étudierons plus tard (3e partie). — Rappelons, au sujet de la réfraction, quelques définitions déjà données à propos de la réflexion. Le *plan d'incidence* est le plan déterminé par le rayon SI (*fig.* 45) et la normale NIN' menée à la surface réfringente au point d'incidence. Soit PQ la trace de ce plan sur le plan tangent au point d'incidence; l'*angle d'incidence* d'un rayon est l'angle SIN $= i$ de ce rayon SI et de la normale IN.

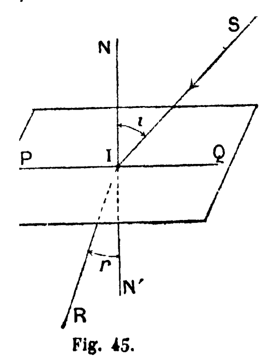


Fig. 45.

On appelle de même *angle de réfraction* l'angle N'IR $= r$ formé par la portion de normale située dans le second milieu avec le rayon réfracté IR.

Cela posé, la première loi du phénomène de la réfraction simple, est facile à constater dans l'expérience de la cuve (fig. 43), si l'on marque la trace du plan d'incidence. C'est la même loi que pour la réflexion : *le rayon réfracté reste dans le plan d'incidence.*

Quant à la seconde loi, qui lie la valeur de l'angle de réfraction à la valeur de l'angle d'incidence, pour la découvrir, il faut commencer par faire des mesures d'angles. — Pour cela, il suffit de posséder un bloc de verre à faces parallèles (presse-papier) d'une certaine épaisseur. Sur la face supérieure de ce bloc (*fig.* 46), traçons à l'encre une ligne OM. Plaçons sous la face inférieure une feuille de papier présentant une série de lignes A, B, C, D..., toutes parallèles à OM, et disposées de telle façon que le plan mené par OM per-

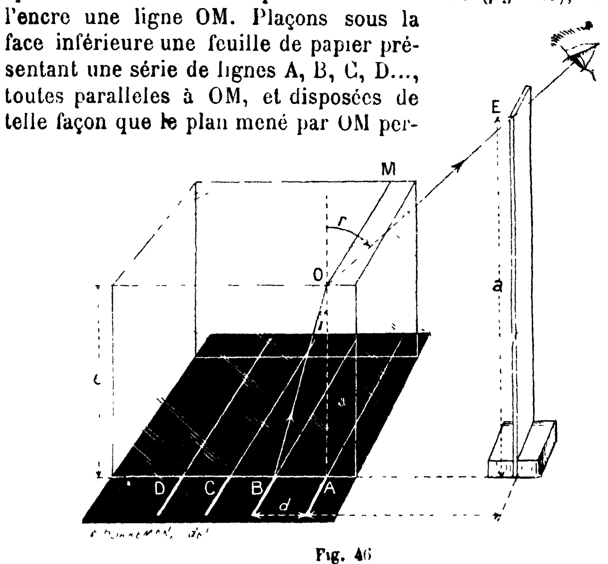


Fig. 46

pendiculairement à la face supérieure du bloc de verre contienne A, la première de ces lignes.

Déplaçons maintenant un écran mince, dont le bord rectiligne E soit également parallèle à OM, jusqu'à ce que le bord E, la ligne B, et la ligne OM paraissent à l'œil se superposer aussi exactement que possible : dans ces conditions, le rayon BO, cheminant dans le verre, se réfracte dans l'air suivant OE. L'épaisseur *e* du bloc de verre étant connue, ainsi que la hauteur *a* de l'écran E au-dessus du plan de la face inférieure de la lame, on mesure avec une règle graduée la distance de l'écran à la ligne A et la distance *d* des deux lignes B et A. On a ainsi tout ce qu'il faut pour construire les angles *i* et *r*, puis les mesurer au rapporteur, à un demi-degré près, par exemple. On opère ensuite de même avec les

lignes C, D..., en éloignant l'écran E. Si les lignes A, B, C, D... ne sont pas trop éloignées l'une de l'autre, on peut facilement avoir ainsi une série de valeurs correspondantes de i et de r. On trouve par exemple :

i		r
8°.	. . . .	12°
15°	. . . .	22° 1/2
27°.	. . . .	42°
31°.	. . . .	53°

Sur ces nombres, on s'aperçoit d'abord que l'on a :

$$\frac{i}{r}=\frac{8}{12}=\frac{15}{22,5}=\frac{2}{3} \text{ ou } 0,66.$$

Il en est encore a peu près de même pour le rapport $\frac{27}{42}=0,64$; mais il n'en est plus ainsi pour le rapport $\frac{31}{53}=0,58$. Donc, la proportionnalité, que l'on constate d'abord entre les angles d'incidence et de réfraction, et qui se conserve assez longtemps au degré d'approximation que nous avons admis, disparaît ensuite (*). — On est ainsi conduit à chercher une relation plus complexe, parmi les lignes trigonométriques de i et de r, dont le rapport se réduise à celui des angles, pour les angles assez petits.

Or, considérons un angle $XOA=\alpha$ (*fig.* 47), et décrivons une circonférence autour de son sommet O comme centre, avec un *rayon quelconque*. Du point de rencontre A de cette circonférence et d'un des côtés de l'angle, abaissons une perpendiculaire AB sur l'autre côté; le rapport $\frac{AB}{OX}$ de la longueur de cette perpendiculaire au rayon est ce qu'on appelle le *sinus* de l'angle XOA, ce que l'on écrit en abrégé $\frac{AB}{OX}=\sin\alpha$. — De même, au point de rencontre X du second côté de l'angle avec la circonférence, menons la tangente à cette circonférence jusqu'à sa rencontre en T avec l'autre côté. Le rapport $\frac{XT}{OX}$ de la longueur de cette tangente au rayon est ce qu'on appelle

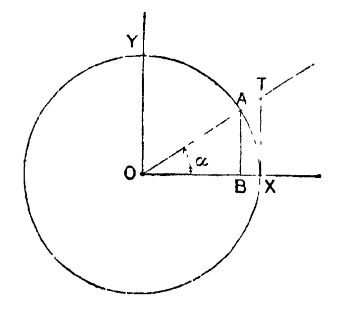


Fig. 47.

(*) Cette proportionnalité avait déjà été reconnue par l'astronome allemand Képler (1571-1630); elle porte le nom de *loi de Képler*

la *tangente* de l'angle XOA, ce que l'on écrit en abrégé $\frac{TX}{OX} = tg\alpha$. — En particulier, si *le rayon* OX *du cercle est égal à l'unité*, on a simplement $\sin\alpha = AB$, $tg\alpha = XT$, et le cercle est appelé le *cercle trigonométrique*. — Il est bien évident sur la figure que, dans ce cas, le sinus et la tangente sont : le premier inférieur, et l'autre supérieur à l'arc AX dont la longueur en fonction du rayon est égale à la mesure de l'angle α en radians (26, *Note*); par conséquent, pour les petits angles, la valeur numérique du sinus ou de la tangente se confond pratiquement avec la valeur de l'angle en radian (*) : un rapport de sinus ou un rapport de tangentes doit donc se réduire à un simple rapport d'angles quand les angles sont petits.

Nous sommes ainsi amenés à chercher les sinus et les tangentes des angles i et r précédents, afin de voir si le rapport des uns ou des autres reste constant, quelles que soient les valeurs des angles d'incidence et de réfraction. En consultant les tables de sinus et de tangentes on trouve :

i	$\sin i$	$tg\, i$	r	$\sin r$	$tg\, r$
8°	0,14	0,14	12°	0,21	0,21
15°	0,26	0,27	22° 1/2	0,38	0,41
27°	0,45	0,52	42°	0,67	0,90
31°	0,51	0,60	53°	0,80	1,33

On tire de là, pour les rapports des arcs, des sinus et des tangentes, le tableau suivant :

Rapport $\frac{i}{r}$	$\frac{\sin i}{\sin r}$	$\frac{tg\, i}{tg\, r}$
0,66	0,66	0,66
0,66	0,68	0,65
0,61	0,67	0,58
0,58	0,64	0,38
	Moyenne : 0,66	

Il résulte de la comparaison de ces nombres, au degré d'approximation que nous avons admis, que le rapport des sinus est le seul qui reste le plus sensiblement constant, aussi bien pour les grands angles que pour les petits. C'est donc la constance de ce rapport qui caractérise la réfraction, et la *seconde loi* de ce phénomène, découverte expérimentalement par Descartes (**), peut s'énoncer comme il suit :

Le rapport du sinus de l'angle d'incidence au sinus de l'angle

(*) C'est précisément pour arriver à ce résultat que l'on mesure les arcs en rayons, et les angles en radians (26, *Note*).

(**) Descartes (1596-1650), illustre savant français, à la fois philosophe, mathématicien et physicien. Auteur du *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison, et*

de réfraction est constant pour deux milieux déterminés, quelle que soit la valeur de l'angle d'incidence. — Cette loi est confirmée du reste par l'accord de tous les faits avec ses conséquences.

Si donc on appelle i l'angle d'incidence, r l'angle de réfraction, et n une constante caractéristique des deux milieux considérés, la loi de Descartes s'exprime par la formule :

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n, \quad \text{d'où} \quad \sin i = n \sin r;$$

La constante n a reçu le nom d'*indice de réfraction* du second milieu par rapport au premier.

Dans le cas où l'on a $n > 1$, c'est-à-dire $\sin i > \sin r$, et par suite $i > r$ (puisqu'il s'agit nécessairement d'angles inférieurs à un quadrant), le rayon, en pénétrant dans le second milieu, se rapproche de la normale; on dit alors que le second milieu est *plus réfringent* que le premier. — Pour $n < 1$, on a au contraire $i < r$, c'est-à-dire que, dans le second milieu, le rayon réfracté s'écarte de la normale; on dit que ce second milieu est *moins réfringent* que le premier. Tel est le cas de l'air par rapport au verre ordinaire, ou par rapport à l'eau; l'indice de l'air par rapport au verre est $\frac{2}{3}$; celui de l'air par rapport à l'eau est $\frac{3}{4}$.

45. ***Interprétation mécanique de l'indice de réfraction.*** — La mesure comparative des vitesses de la lumière dans l'air et dans l'eau, effectuée par Foucault, a montré que l'indice $\frac{3}{4}$ de l'air par rapport à l'eau est égal au rapport des vitesses de la lumière dans l'eau et dans l'air. La vitesse dans l'eau est en effet les $\frac{3}{4}$ de la vitesse dans l'air. — D'une façon générale, nous admettons comme démontré par l'expérience que l'*indice de réfraction du second milieu, par rapport au premier, est égal au rapport de la vitesse de la lumière dans le premier milieu à la vitesse de la lumière dans le second.* Si V_A et V_B sont les vitesses de la lumière dans les milieux A et B, l'indice de B par rapport à A aura pour valeur :

$$n = \frac{V_A}{V_B}.$$

chercher la vérité des sciences, il est considéré comme le fondateur de la philosophie moderne. En Mathématiques, on lui doit la création de la *Géométrie analytique*. En Physique, il s'est surtout attaché aux conceptions théoriques, en délaissant la méthode expérimentale inaugurée par Galilée. Il a cependant énoncé dans sa *Dioptrique* la loi de la réfraction, dont il a fait une application à la théorie du phénomène de l'arc-en-ciel.

46 ***Indice de retour.* — *Loi du retour inverse de la lumière.*** — Il résulte de la signification mécanique des indices de réfraction que, si n est l'indice du milieu B par rapport au milieu A, et m l'indice du milieu A par rapport au milieu B, on doit avoir :

$$n = \frac{V_A}{V_B} \quad \text{et} \quad m = \frac{V_B}{V_A} = \frac{1}{n}.$$

L'*indice de retour* est donc l'*inverse* du premier . ainsi, l'indice de l'air par rapport au verre étant $\frac{2}{3}$, celui du verre par rapport à l'air sera $\frac{3}{2}$. — Si l'on considère deux mêmes milieux, il y a donc, de l'un à l'autre, deux indices de réfraction, inverses l'un de l'autre; la connaissance de l'un d'eux, par exemple de l'indice n plus grand que l'unité, suffit aux deux cas; dans le retour inverse, il n'y a qu'à changer n en $\frac{1}{n}$.

Par suite, si l'on désigne par i un angle d'incidence dans le milieu A, et par r l'angle de réfraction correspondant dans le milieu B, on a, d'une part,

$$\sin i = n \sin r.$$

Réciproquement, si r est pris comme angle d'incidence dans le milieu B, l'angle de réfraction i_1 correspondant dans le milieu A doit vérifier la relation

$$\sin r = \frac{1}{n} \sin i_1, \quad \text{ou} \quad \sin i_1 = n \sin r.$$

Il en résulte que $i_1 = i$; en d'autres termes, si l'on change le sens de propagation de la lumière, elle suit la route exactement inverse; il y a réciprocité entre le rayon incident et le rayon réfracté.

C'est en effet ce que l'on peut vérifier, en reprenant l'expérience de la figure 38. Si l'on place sur le fond horizontal du vase un petit miroir plan R (fig. 48), on constate que le trajet MIRI'M', suivi par la lumière est *symétrique* par rapport à la normale au point de réflexion R. Or l'angle d'incidence en I' dans l'eau est égal à r et à cet angle d'incidence r correspond bien l'angle de réfraction i.

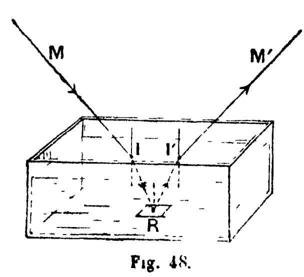


Fig. 48.

Nous admettrons donc comme *troisième loi* du phénomène de la réfraction, vérifiée par l'expérience, la loi du *retour inverse de la lumière*, c'est-à-dire la *réciprocité du rayon*

incident et du rayon réfracté. Cette loi est du reste confirmée par toutes ses conséquences.

La principale de ces conséquences, c'est qu'un rayon lumineux qui traverse une *lame à faces parallèles*, en contact de part et d'autre avec un même milieu, ne doit éprouver aucune déviation : le rayon émergent doit être parallèle à la direction primitive. La figure 49 montre en effet que les deux angles désignés par r et r' sont égaux comme alternes-internes, on doit donc avoir $i'=i$. On peut le vérifier en visant l'étoile Polaire avec une lunette et en interposant ensuite, entre la lunette et l'étoile immobile dans le ciel, une lame de verre à faces parallèles, placée obliquement par rapport à l'axe de la lunette. On constate que l'image de l'étoile continue à se former au point de croisée des fils du réticule. Cela prouve, comme nous le comprendrons plus tard, que les rayons, après avoir traversé la lame, ont conservé leur direction primitive. — Cette vérification expérimentale est très précise.

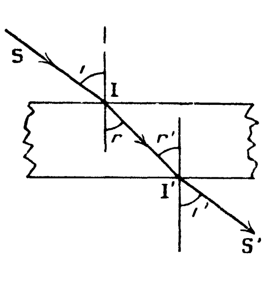


Fig. 49.

47 ***Indices usuels.*** — ***Indices absolus.*** — On appelle *indice usuel* d'un milieu M son indice de réfraction par rapport à l'air, c'est-à-dire le quotient

$$n=\frac{V_a}{V_M}.$$

On appelle *indice absolu* l'indice pris par rapport au vide, c'est-à-dire le quotient

$$N=\frac{V_v}{V_M}.$$

Il existe entre ces deux indices d'une même substance une relation très simple. Comme l'on a identiquement

$$\frac{V_v}{V_M}=\frac{V_a}{V_M}\times\frac{V_v}{V_a}$$

et que $\frac{V_v}{V_a}$ est l'indice absolu de l'air, il en résulte que, si l'on désigne ce dernier par μ, on a

$$N=n\,\mu;$$

l'indice absolu d'une substance est égal à son indice usuel, multiplié par l'indice absolu de l'air.

Dans les conditions normales de température et de pression (0°

et 76 cm de mercure), l'indice absolu de l'air est très voisin de 1,0003. Ce nombre est tellement voisin de l'unité, que l'indice absolu peut être pratiquement confondu avec l'indice usuel.

Il résulte encore des définitions précédentes un théorème important, connu sous le nom de théorème des indices, et qui s'énonce de la façon suivante : *l'indice m, d'un milieu B par rapport à un milieu A, est égal au rapport de l'indice usuel de B à l'indice usuel de A.*

En effet, soient n_A et n_B les indices usuels de A et de B, on a identiquement

$$m = \frac{V_A}{V_B} = \frac{\left(\frac{V_a}{V_B}\right)}{\left(\frac{V_a}{V_A}\right)} = \frac{n_B}{n_A}.$$

Par conséquent, les indices usuels des diverses substances, qui sont les plus faciles à mesurer, suffisent à tous les besoins. Ainsi, les indices usuels du verre (B) et de l'eau (A) étant $n_B = \frac{3}{2}$ et $n_A = \frac{4}{3}$, l'indice du verre par rapport à l'eau est

$$m = \frac{3}{2} : \frac{4}{3} = \frac{9}{8} \ (*).$$

Si i est l'angle d'incidence dans le milieu A, et r l'angle de réfraction dans le milieu B, la relation $\sin i = n \sin r$ peut s'écrire $\sin i = \frac{n_B}{n_A} \sin r$, ou $n_A \sin i = n_B \sin r$. Cette dernière formule est une généralisation de celle de Descartes : le *produit de l'indice usuel d'un milieu par le sinus de l'angle d'incidence dans ce milieu est égal au produit de l'indice usuel du second milieu par le sinus de l'angle de réfraction.*

48. *Discussion de la loi de Descartes. — Cas où la lumière passe d'un milieu dans un autre milieu plus réfringent. — Angle de réfraction limite.* — Lorsque des rayons lumineux se présentent pour passer d'un milieu dans un autre milieu *plus réfringent*, de l'air dans l'eau, par exemple, c'est-à-dire lorsque l'indice n est *supérieur à l'unité*, l'expérience de la fig. 43 montre *qu'il y a toujours des rayons transmis*, quel que soit l'angle d'incidence. La loi de Descartes permet d'ailleurs toujours de déterminer la direction des rayons réfractés. — Il suffit pour cela de remarquer, sur la

(*) C'est grâce à cette différence des deux indices, que nous distinguons un morceau de verre dans de l'eau. Au contraire, le verre ordinaire ayant même indice que le phénol, un morceau de verre plongé dans du phénol cesse d'être vu. C'est là une expérience comparative, que l'on peut faire, par exemple, avec du verre pilé.

figure 42 du cercle trigonométrique, que le numérateur d'un sinus est toujours inférieur au rayon du cercle, c'est-à-dire le sinus inférieur à l'unité, et que lorsqu'un angle varie entre 0° et 90°, son sinus varie lui-même de zéro à 1.

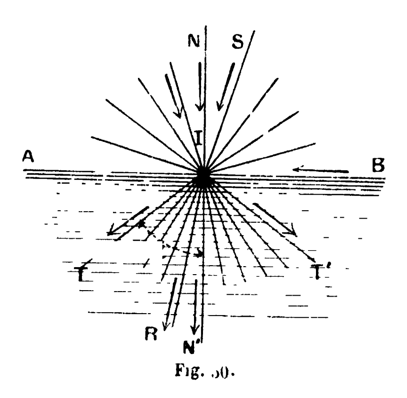


Fig. 50.

Soit, par exemple, un rayon NI (*fig.* 50), arrivant de l'air en un point d'une surface d'eau, *dans la direction même de la normale*. On a, pour ce rayon, $i=0$; par suite $r=0$, c'est-à-dire que le rayon pénètre dans l'eau *sans déviation*, suivant IN'. — Pour un rayon *quelconque* SI, tombant au même point I, sous un angle d'incidence i, la loi de Descartes donne

$$\sin r = \frac{\sin i}{n};$$

comme $\sin i$ est inférieur à l'unité, le second membre de l'équation est toujours moindre que 1; donc, quel que soit i, il existe un angle r, dont le sinus satisfait à cette équation, et qui définit la direction IR du rayon réfracté. A mesure que l'angle i augmente, l'angle r augmente aussi. — Enfin, pour un rayon qui tomberait *dans une direction rasante* BI, on aurait $i=90°$, c'est-à-dire $\sin i = 1$; par suite, $\sin r = \frac{1}{n}$ ou, dans le cas actuel, $\sin r = \frac{3}{4}$, ce qui donne, pour la valeur de r, environ 48°. On obtient ainsi la direction du rayon réfracté IT, correspondant au rayon incident BI.

Dès lors, pour tous les rayons incidents qui tombent au point I, il y a réfraction, et les rayons réfractés sont compris à l'intérieur du cône TIT', qu'on obtiendrait en faisant tourner l'angle TIN' autour de la normale IN'. — Nous venons de voir que, pour l'eau par rapport à l'air, la valeur de cet *angle de réfraction limite* est d'environ 48 degrés. Pour une substance quelconque, d'indice $n > 1$ par rapport à une autre, l'angle de réfraction limite est toujours l'angle dont le sinus est égal à $\frac{1}{n}$.

Mais il est essentiel de remarquer que les divers rayons réfractés ne conservent pas, en égale proportion, *l'intensité lumineuse* des rayons incidents. — En effet, quand un rayon lumineux tombe sur

la surface d'un corps transparent, c'est un fait d'observation que la proportion de lumière *réfléchie* augmente avec l'angle d'incidence; par suite, la proportion de lumière *réfractée* diminue à mesure que l'angle d'incidence augmente. En d'autres termes, l'intensité lumineuse du rayon réfracté IN' (*fig.* 50) est presque égale à celle du rayon incident NI, tandis que l'intensité des rayons réfractés voisins de IT est presque nulle.

49. *Déviation.* — On appelle *déviation* produite par une réfraction, l'angle que fait la nouvelle direction de la lumière avec la direction primitive, c'est-à-dire l'angle $i-r$.

Il est facile de montrer que la déviation augmente avec l'angle i. En effet, tandis que l'angle i dans le milieu le moins réfringent varie de 0° à 90°, l'angle r dans le milieu le plus réfringent ne varie que de zéro à l'angle limite, toujours inférieur à 90°. On est donc conduit à admettre que toute variation de l'angle dans le milieu le moins réfringent est plus grande que la variation correspondante dans le milieu le plus réfringent; alors la différence $i-r$ augmente avec i. C'est ce qui résulte en particulier des nombres du tableau du paragraphe 44.

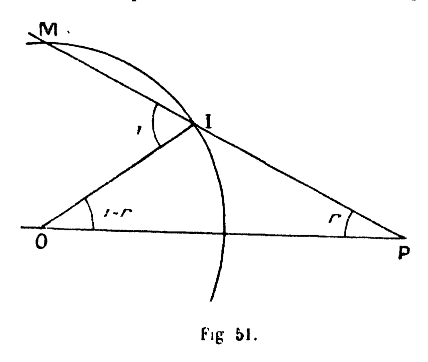


Fig 51.

Une construction géométrique simple permet de montrer cette propriété : décrivons une circonférence de centre O (*fig.* 51) et, sur un diamètre quelconque, portons à partir de O une longueur $OP = nR$, n étant l'indice et R le rayon de la circonférence; menons de P une sécante PI telle que OPI soit égal à l'angle de réfraction r; l'angle MIO est alors égal à i, car

$$\frac{\sin MIO}{OP} = \frac{\sin r}{OI};$$

mais $OP = n\,OI$, donc cette équation se réduit à

$$\sin MIO = n \sin r,$$

donc MIO est l'angle i qui satisfait à la loi de Descartes. Alors $IOP = i - r$, est la déviation, et il est visible qu'elle croît avec r et par suite avec i.

50 *Cas où la lumière passe d'un milieu dans un autre milieu moins réfringent.* — Considérons maintenant le cas où les

rayons se présentent pour passer d'un milieu dans un autre milieu *moins réfringent*, de l'eau dans l'air, par exemple, c'est-à dire le cas où l'indice n est *inférieur à l'unité.* — Nous allons voir que, dans certains cas, *ce passage devient impossible.*

Soit un point lumineux O (*fig.* 52), situé dans l'eau et émettant des rayons vers la surface plane de l'eau. Le rayon OP, qui tombe normalement, à la surface de l'eau, sort *sans déviation,* suivant PM, et l'intensité lumineuse du rayon émergent est *sensiblement égale* à celle du rayon incident. Un rayon OR, qui tombe sur la surface de l'eau suivant un angle d'incidence assez petit, sort de l'eau *en s'écartant de la normale;* l'intensité lumineuse de ce rayon RS est moindre que celle du rayon incident OR, une portion de la lumière incidente étant réfléchie vers la partie inférieure. — Si maintenant on considère des rayons incidents qui s'écartent de plus en plus de la direction OP, on sait, d'après la loi du retour inverse, qu'il y aura des rayons réfractés tant que l'angle d'incidence dans l'eau ne sera pas supérieur à 48°. c'est-à-dire tant que l'on aura $\sin i < \frac{3}{4}, \frac{3}{4}$ étant l'indice de l'air par rapport à l'eau.

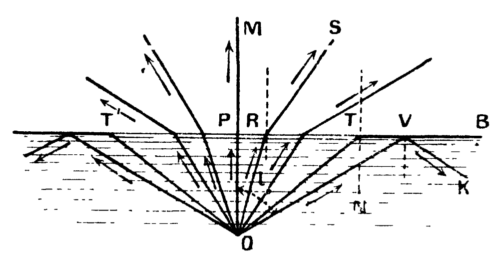


Fig 52

D'une manière générale, si n est l'indice du second milieu par rapport au premier ($n < 1$), il y aura un rayon réfracté tant que l'angle d'incidence sera plus petit qu'une valeur l définie par l'équation

$$\sin l = n;$$

le rayon OT (*fig.* 52) est justement dans ce cas; l'angle de réfraction est alors de 90°, comme le veut en effet la loi de Descartes, car si dans l'équation

$$\sin i = n \sin r,$$

la valeur de i est telle que $\sin i = n$, c'est-à-dire si l'on a $i = l$, il en résulte $\sin r = 1$, ou $r = 90°$; le rayon TB émerge donc en rasant la surface réfringente. — L'intensité du rayon émergent TB est d'ailleurs faible, la plus grande partie de la lumière est réfléchie. Le

dispositif de la figure 48 permet, en rendant le petit miroir R mobile, de vérifier sans peine ces résultats.

Reste à examiner ce qui se produit lorsque l'angle d'incidence croît au delà de la valeur l; alors, dans l'équation $\sin i = n \sin r$, $\sin i$ devient plus grand que n; il en résulterait $\sin r > 1$, inégalité impossible, car il n'y a pas d'angle réel dont le sinus soit supérieur à l'unité, la loi de Descartes conduit dans ce cas à une impossibilité mathématique.

Cette valeur particulière l de l'angle d'incidence, pour laquelle l'angle de réfraction est de 90°, s'appelle *l'angle d'incidence limite*, ou souvent par abréviation, *l'angle limite*.

Pour lever la difficulté qui se présente, lorsque $i > l$, il est nécessaire de recourir à l'expérience.

51 *Réflexion totale.* — L'expérience montre qu'il y a alors *réflexion totale*, c'est-à-dire que toute la lumière du rayon incident OV (*fig.* 52) se retrouve dans le rayon réfléchi VK, et qu'aucune partie de cette lumière ne sort du liquide. Il en est de même pour tous les rayons émis par le point O en dehors du cône que l'on obtiendra en faisant tourner l'angle TOP autour de la normale OP. Cet angle TOP, est alors égal à l'angle d'incidence limite OTN ou l, puisque ces deux angles sont alternes-internes, par rapport aux parallèles OP et TN coupées par la sécante OT.

D'une façon moins directe, on peut encore montrer la réflexion totale par l'expérience suivante. Mettons de l'eau dans un vase de verre (*fig.* 53) et faisons flotter sur cette eau un disque de liège circulaire D', d'environ 3 cm de rayon, au-dessous duquel nous aurons adapté une épingle A, perpendiculaire à sa surface, et ayant une longueur d'environ 2 cm. En raison de ces dimensions, tout rayon lumineux AI émis par un point quelconque de l'épingle, et venant rencontrer la surface de l'eau en dehors du disque, fait avec la normale au point d'incidence un angle AIN *plus grand que l'angle limite* de 48°, et éprouve, par suite, la *réflexion totale*. On constate en effet que, *quel que soit le point où l'on place l'œil en O au-dessus de la surface de l'eau, il est impossible d'apercevoir l'épingle.* — Au contraire, en plaçant l'œil en O', au-dessous de cette surface, on aperçoit une image de l'épingle, par réflexion. Cette image est seulement

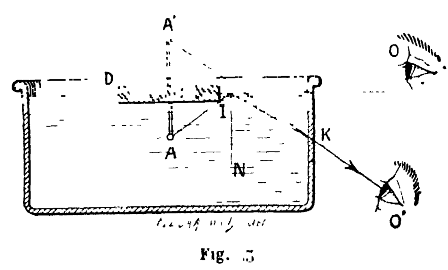


Fig. 53

un peu allongée, en raison de la déviation qu'éprouvent les rayons lumineux en sortant de l'eau, en K, comme le montre la figure.

52. ***Prismes à réflexion totale.*** — Les indices usuels des diverses espèces de verre ayant toujours une valeur au moins égale à 1,5, l'angle limite à la sortie du verre dans l'air, et défini par l'équation $\sin l = \frac{1}{1,5}$ est inférieur à 42°. Envisageons un prisme triangulaire de verre, à base rectangle et isocèle ABC (*fig.* 54); soit S un point lumineux, situé à une distance telle que tous les rayons émis par ce point sur une des faces AB de l'angle droit s'écartent peu de la direction normale à cette face. Le rayon normal SI pénètre sans déviation par la face AB; il éprouve la réflexion totale sur la face hypoténuse AC, qu'il rencontre sous un angle de 45°; enfin, il sort normalement à la face BC, suivant IR. Quant aux rayons voisins Sm, Sn, qui sont émis par le même point S, ils tombent toujours sur la face hypoténuse sous un angle voisin de 45°, ils se comportent donc de la même manière.

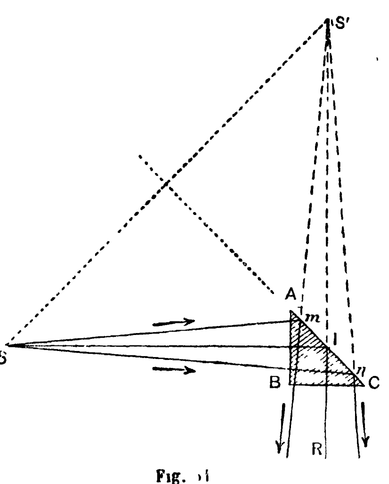


Fig. 54

– Si les dimensions AB et BC du prisme sont négligeables par rapport à la distance du prisme au point lumineux, on peut faire abstraction des réfractions à l'entrée et à la sortie, et le prisme se comporte alors sensiblement comme un miroir plan : il donne une image virtuelle S′, symétrique de S par rapport au plan de la face AB.

Dans certains instruments d'optique, lorsqu'un faisceau formé de rayons à peu près parallèles doit être réfléchi dans une direction perpendiculaire à sa direction primitive, il est avantageux d'employer un prisme à réflexion totale, plutôt qu'un miroir métallique dont la surface éprouve, avec le temps, une altération assez rapide.

53. ***Réfractions dans un milieu hétérogène. — Propagation curviligne de la lumière. — Réfraction astronomique. — Mirage.*** — Lorsqu'un rayon lumineux traverse un milieu non homogène, la direction de ce rayon change aux divers points de sa trajectoire, par suite des variations de l'indice de réfraction d'un point à un autre.

On conçoit même que la trajectoire puisse être *curviligne*, si la variation d'indice est continue.

Ce phénomène se produit dans notre atmosphère, lorsque le trajet de la lumière est un peu considérable. Un rayon, tel que Ea, émis par un astre, éprouve, en traversant les couches d'air atmosphérique, dont les densités, et par suite les indices, vont progressivement en croissant, des réfractions en a, b, c... qui ont pour effet de le rapprocher des normales Oa, Ob, Oc... (*fig.* 55). Un observateur placé en A voit l'astre dans la direction AE′, en sorte que l'astre paraît plus voisin du zénith qu'il ne l'est en réalité. — Ainsi, le Soleil ou les astres nous apparaissent *au-dessus de l'horizon*, dès qu'ils sont situés à une petite distance *au-dessous du plan tangent* mené à la surface de la Terre. On désigne ce phénomène sous le nom de *réfraction astronomique* : des Tables ont été calculées, pour permettre d'en corriger les observations astronomiques (*).

Fig. 55.

De même, lorsque des couches d'air se sont échauffées au contact du sol, elles sont devenues moins réfringentes que les couches supérieures, et l'indice, au voisinage du sol, décroît, par exception, de *haut en bas*; on conçoit alors qu'un rayon, provenant d'un point lumineux P, placé à une hauteur plus ou moins grande, et se dirigeant vers le sol, puisse, en s'écartant sans cesse des normales aux couches horizontales successives, avoir une marche curviligne, tournant sa convexité vers le sol (*fig.* 56). Ce rayon éprouve en un certain point H une réflexion totale, sous un angle voisin de 90°, et il se redresse en une trajectoire à peu près symétrique de la première par rapport à la verticale en H. Il arrive à l'œil, placé en O, dans une direction OP′, tandis qu'un autre rayon partant du même point P peut parvenir en O directement; l'œil croit alors voir le point P à la fois en P et en P′, comme s'il y

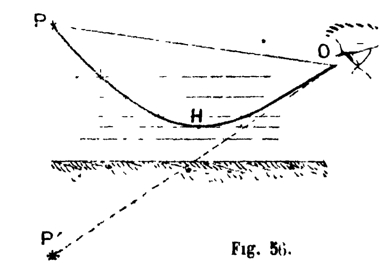


Fig. 56.

(*) Cette influence a été fortement exagérée dans la figure 49. La déviation est d'environ un demi degré à l'horizon.

avait réflexion sur une nappe d'eau. C'est le phénomène du *mirage*.

On peut réaliser des conditions analogues à celles du phénomène du mirage, au moyen de l'expérience suivante. — Dans une longue cuve de verre C (*fig.* 57), on verse une solution concentrée de sel marin; au-dessus, on ajoute doucement de l'eau pure, et l'on abandonne la masse liquide à la diffusion pendant plusieurs heures. On obtient ainsi un milieu hétérogène,

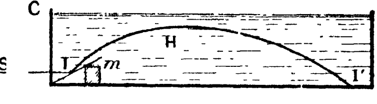


Fig. 57

dont la densité et l'indice croissent d'une façon continue *depuis la surface libre jusqu'au fond*; c'est la seule différence avec les conditions du mirage. La cuve étant dans une salle obscure, on dirige un faisceau horizontal de rayons lumineux SI dans les couches inférieures : un petit miroir *m*, placé dans la cuve, ou mieux à côté, renvoie les rayons vers la surface, et l'on observe la trajectoire curviligne IHI′ de la lumière.

II. — Surface plane et lame à faces parallèles.

54. ***Réfraction à travers une surface plane.*** — L'ensemble des rayons issus d'un point S, qui se réfractent à travers une surface plane, ne donne généralement pas naissance à une image de ce point. En effet, si cette image existait, elle serait nécessairement située sur le rayon perpendiculaire SH (*fig.* 58). Appelons S′ le point de rencontre du prolongement du rayon réfracté IR avec la normale SH; l'angle HSI est égal à l'angle d'incidence *i* et l'angle HS′R est égal à l'angle de réfraction *r*. Or, dans les triangles IHS et IHS′, on a (44)

$$\operatorname{tg} i = \frac{\text{HI}}{\text{HS}} \qquad \operatorname{tg} r = \frac{\text{HI}}{\text{HS}'},$$

d'où

$$\frac{\operatorname{tg} i}{\operatorname{tg} r} = \frac{\text{HS}'}{\text{HS}},$$

c'est-à-dire

$$\text{HS}' = \text{HS}\,\frac{\operatorname{tg} i}{\operatorname{tg} r}.$$

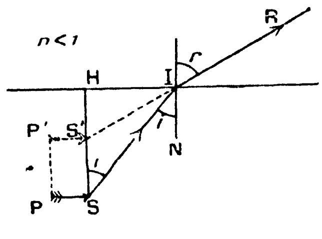


Fig. 58.

Pour que le point S′ fût le même pour tous les rayons tels que SI, il faudrait donc que HS′ fût constant, c'est-à-dire que le rapport $\frac{\operatorname{tg} i}{\operatorname{tg} r}$ fût constant. Or, nous savons qu'il n'en est pas ainsi, puisque c'est le rapport des sinus qui est constant; un faisceau conique incident

n'admet donc plus de sommet, après sa réfraction à travers une surface plane. Il ne pourrait y avoir *approximativement* de sommet que pour un pinceau de rayons réfractés voisins de la normale SH, car alors on a sensiblement (loi de Képler, 44),

$$\frac{\operatorname{tg} i}{\operatorname{tg} r} = \frac{i}{r} = \frac{\sin i}{\sin r} = n.$$

Un tel faisceau de rayons constitue ce qu'on appelle un faisceau de *rayons centraux* (27). Un faisceau conique de rayons centraux peut donc seul donner naissance à une image sensiblement nette, dont la distance $HS' = x'$ à la surface réfringente plane est donnée, en fonction de la distance $HS = x$ du point objet, par la relation $x' = nx$. Si l'on considère un petit objet SP, perpendiculaire à SH, et si l'on envisage seulement les rayons centraux partis de ses divers points, il aura pour image la droite virtuelle $S'P' = SP$, c'est-à-dire que le rapport $\frac{i}{o} = +1$.

55. ***Vision des objets dans l'eau.*** — Lorsqu'on fait intervenir l'œil pour observer des faisceaux réfléchis ou réfractés, il faut songer que le faisceau utilisé est toujours très petit, puisqu'il est limité par la pupille.

Les résultats précédents permettent alors de se rendre compte des conditions de la vision des objets séparés de notre œil par une surface réfringente plane, telle que la surface d'une nappe d'eau. Les images ne sont nettes que dans le cas où notre œil reçoit les rayons qui se sont réfractés *dans le voisinage de la normale.* Ces images virtuelles sont *rapprochées* de la surface (*fig.* 58), si l'objet est situé dans le milieu le plus réfringent (eau), et l'œil dans le milieu le moins réfringent (air). L'image est relevée de SS', c'est-à-dire de $x - x'$ ou $x(1 - n)$; dans le cas de l'air par rapport à l'eau, $n = \frac{3}{4}$, alors $1 - n = \frac{1}{4}$; un objet situé à 4 m de profondeur semble n'être qu'à 3 m de la surface. — Dans le cas de la *vision oblique*, l'image manque en général de netteté, et présente des déformations plus ou moins considérables : les dimensions des objets semblent raccourcies ou conservées, suivant qu'elles sont perpendiculaires ou parallèles à la surface réfringente; de plus, le relèvement de l'image est d'autant plus grand que la vision est plus oblique

56. ***Réfraction et vision des objets à travers une lame à faces parallèles.*** — Nous avons vu (46) qu'un rayon lumineux SI (*fig.* 49), qui traverse une lame à faces parallèles dont les deux faces sont en contact avec un même milieu, n'éprouve pas de changement de direction, c'est-à-dire *pas de déviation*; il sort de la lame suivant une direction I'S' parallèle à SI. On appelle *translation* la distance

du rayon émergent au rayon incident. — La translation dépend évidemment de l'épaisseur de la lame, ainsi que de l'angle d'incidence : elle augmente avec l'une et avec l'autre, comme on le constate, lorsqu'on regarde une série de lignes parallèles à travers une telle lame (*fig.* 59) : ces lignes restent, pour l'œil, parallèles entre elles, et parallèles à leur direction primitive, mais elles éprouvent une translation d'autant plus grande que l'on regarde plus obliquement, ou que la lame est plus épaisse.

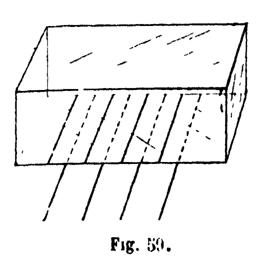


Fig. 59.

Si l'on regarde *normalement* à travers la lame, les lignes, vues dans ces conditions, n'éprouvent pas de translation, mais elles semblent *plus rapprochées* que celles qui sont vues directement; c'est ce dont il est facile de se rendre compte par l'effet de chacune des deux réfractions successives à travers les faces planes de la lame. On sait d'abord qu'il ne peut y avoir d'image nette d'un point lumineux à travers une surface plane que pour des rayons centraux. Soit donc S (*fig.* 60) un point lumineux, S′ son image virtuelle, fournie par la première réfraction, et S″ l'image virtuelle définitive. La construction géométrique montre déjà bien que l'image S″ est plus rapprochée de la lame que le point S. Calculons le rapprochement. Pour cela, posons $H'H = e$, épaisseur de la lame, $HS = x$, $HS' = x'$ et $H'S'' = x''$. On sait (54) que l'on a, en désignant par n l'indice de la lame,

$$(1) \qquad x' = nx.$$

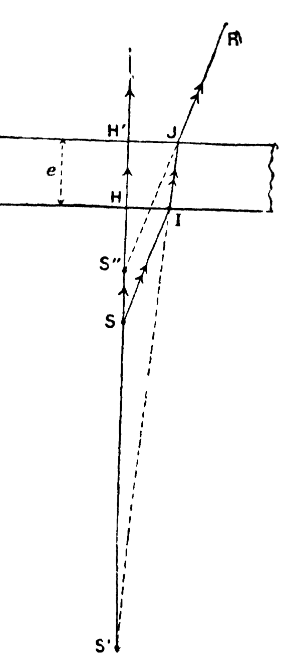


Fig. 60.

D'ailleurs l'image S″ doit se déduire de S′ en comptant les distances à la seconde face H′, comme S′ s'est déduit de S en comptant les distances à la première face, mais en changeant de plus n en $\frac{1}{n}$, puisque la lumière passe alors de la

lame dans le milieu ambiant. On a donc

$$(2) \qquad x'' = \frac{1}{n}(x' + e) = \frac{1}{n}(nx + e) = x + \frac{e}{n}.$$

Par suite, le rapprochement S″S du point lumineux regardé à travers la lame est

$$S''S = H'S - H'S'' = x + e - x - \frac{e}{n} = e\left(1 - \frac{1}{n}\right).$$

Ce rapprochement est indépendant de x; il ne dépend que de e et de n. Pour une lame de verre $n = \frac{3}{2}$, ou $\frac{1}{n} = \frac{2}{3}$, et $S''S = \frac{1}{3}e$.

Dans la vision *oblique*, les images manquent de netteté, et présentent en général des déformations.

57. ***Images multiples, produites par les miroirs argentés.*** — Un miroir plan argenté est formé d'une lame de verre à faces parallèles, argenté sur sa seconde face. Lorsqu'on examine l'image de la flamme d'une bougie produite dans ces conditions, on constate, en se plaçant un peu obliquement, qu'il y a plusieurs images, placées les unes derrière les autres, et dont la seconde est la plus intense. Il est facile de s'en rendre compte. Soit S (*fig.* 61) l'extrémité de la flamme de la bougie; prenons pour plan de figure un plan passant par cette extrémité, et perpendiculaire aux faces du miroir. La première image a, assez pâle, provient de la réflexion de la lumière à la première face. Mais le rayon SI ne donne pas seulement naissance au point I, à un rayon réfléchi; une partie notable de la lumière incidente pénètre dans la lame, se réfléchit en I′ à la seconde face, revient en I″ à la première face, sort en partie, se réfléchit de nouveau, et ainsi de suite en I‴, I^{IV}.... Tous ces rayons parallèles produisent en définitive, pour l'œil, la sensation d'images situées dans leurs prolongements; ces images sont sensiblement nettes, et disposées sur SH, à égale distance les unes des autres, s'il s'agit de rayons suffisamment voisins de la normale SH. — Il y a donc théoriquement une infinité de ces images; mais pratiquement, au bout d'un certain nombre de réflexions, il n'y a plus assez d'intensité lumineuse pour que les images soient perceptibles. On ne voit donc, en réalité, qu'un nombre limité de ces images.

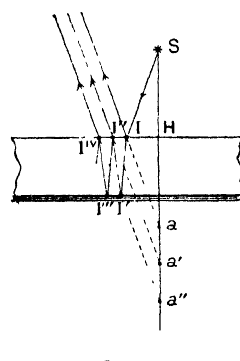


Fig. 61

III. — Prisme.

58. ***Définitions.*** — On désigne, en Optique, sous le nom de *prisme*, un milieu transparent, limité par deux faces planes P et P′ (*fig.* 62), faisant entres elles un certain angle. — On appelle *angle réfringent*, l'angle dièdre AA′ formé par ces deux faces. — On comprend sous le nom de *base du prisme* la région opposée à l'arête de cet angle et qui, pratiquement, limite le prisme. — Dans les prismes de verre qui servent aux expériences d'optique, la base est limitée par un plan B parallèle à l'arête réfringente. La masse de verre présente alors la forme du solide que l'on désigne, en Géométrie, sous le nom de prisme triangulaire.

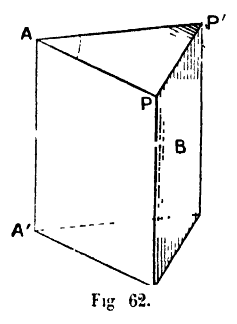


Fig 62.

On appelle *section principale* d'un prisme toute section faite perpendiculairement à l'arête réfringente : c'est ce qu'on désigne, en Géométrie sous le nom de *section droite*. — Dans ce qui va suivre, nous supposerons essentiellement que les rayons incidents sont *dans le plan d'une section principale*.

59. ***Action d'un prisme sur un faisceau de lumière parallèle blanche : déviation et dispersion.*** — Faisons pénétrer dans une chambre obscure, par une très petite ouverture O (*fig* 63), un étroit

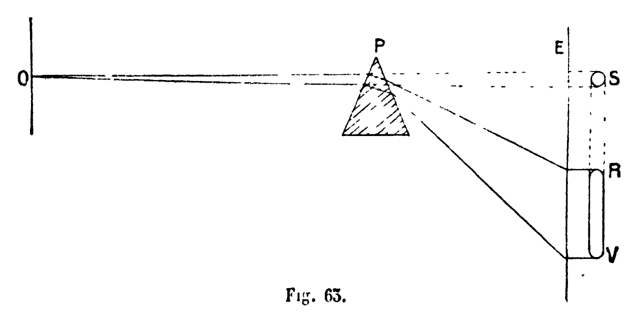


Fig. 63.

pinceau de rayons solaires (ou autres, mais de lumière blanche). Ce pinceau forme sur un écran E, perpendiculaire à sa direction, une image de chambre noire (6), ronde et blanche S du Soleil (ou de la forme de la source). Interposons sur le trajet un prisme P, qui reçoive l'axe du faisceau dans une section principale. On constate

sur l'écran, que les rayons émergents sont *déviés vers la base du prisme;* de plus, au lieu d'une image solaire ronde, S, on obtient, comme image, une bande rectangulaire *colorée* RV allongée perpendiculairement à l'arête du prisme, et terminée par des demi-cercles, comme l'indique le rabattement de l'écran sur la droite de la figure. On donne à ce phénomène le nom de *dispersion.*

Les colorations obtenues varient de R à V, en se fondant progressivement les unes dans les autres, de sorte qu'il est impossible de distinguer où finit l'une et où commence l'autre. On les rapporte, depuis Newton, à sept nuances principales : *violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.* C'est le *violet* V qui est le *plus dévié* vers la base du prisme, et le *rouge* R qui est *le moins dévié.*

Ces couleurs restent les mêmes si l'on prend, par exemple, un prisme à liquide (sulfure de carbone) : l'étalement seul change, toutes choses égales d'ailleurs, avec l'angle et la matière du prisme. Les couleurs restent encore les mêmes si l'on remplace la lumière solaire par la lumière blanche produite par les charbons de l'arc électrique, ou par la pastille de magnésie du chalumeau oxhydrique. On a donné à cette bande colorée le nom de *spectre de la lumière blanche.*

De ces divers effets, nous allons étudier exclusivement le premier, la *déviation;* l'autre, la *dispersion* de la lumière blanche, sera étudié plus tard. Lorsqu'on voudra éliminer la dispersion, il suffira d'interposer, sur le trajet des rayons de lumière blanche, une lame de verre rouge, qui ne laissera passer qu'une lumière d'une seule couleur (lumière monochromatique).

60. ***Déviation produite par un prisme.*** — Il est facile de se

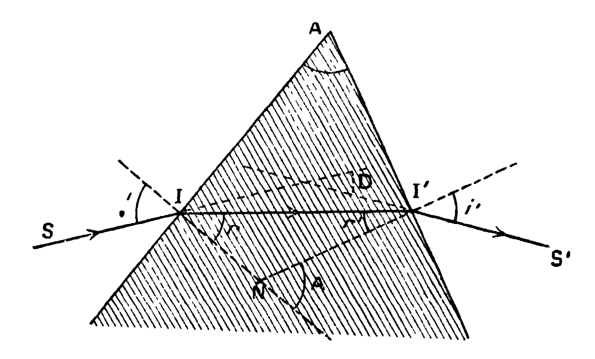


Fig. 64.

rendre compte de la déviation produite par un prisme. Soient en effet (*fig.* 64) une *section principale* d'un prisme, et SI un rayon

incident monochromatique situé dans cette section principale : ce rayon pénètre dans le prisme en se rapprochant de la normale, suivant II'. En arrivant en I', le rayon éprouve, en général, une nouvelle réfraction (à condition qu'il tombe sous un angle d'incidence inférieur à l'angle limite); il s'écarte alors de la normale, et sort du prisme en restant dans le plan de la figure, dans une direction telle que I'S'. Ces deux réfractions, en I et I', ont donc, l'une et l'autre, pour effet de dévier le rayon *vers la base du prisme.* — On appelle *angle de déviation*, l'angle D que forme le rayon émergent I'S' avec le prolongement du rayon incident SI.

61. ***Équations du prisme.*** — Dans le triangle INI' formé par les normales et le rayon II' (*fig.* 64), l'angle extérieur en N est égal à l'angle A, comme ayant leurs côtés respectivement perpendiculaires; d'autre part, cet angle extérieur N est aussi égal à la somme $r+r'$, on a donc :

$$r+r'=A. \tag{1}$$

La déviation totale D est égale à la somme des déviations partielles; en I, le rayon est dévié de $i-r$ vers la base; en I' il est dévié aussi vers la base, de $i'-r'$; par suite, la déviation totale, du sommet vers la base, aura pour expression

$$D=(i-r)+(i'-r')$$

ou

$$D=i+i'-(r+r')=i+i'-A. \tag{2}$$

Enfin, d'après la loi de la réfraction, on a

$$\sin i=n\sin r \tag{3}$$

$$\sin i'=n\sin r'. \tag{4}$$

Ces quatre équations sont les *équations du prisme.* Elles renferment *sept* quantités; il y a donc *trois* variables indépendantes.

Ainsi le prisme étant donné par son indice de réfraction n et par son angle A, et la direction du rayon incident SI étant déterminée par l'angle i, l'équation (3) fera connaître la valeur de r'; l'équation (4) fera ensuite connaître i'; enfin, en portant dans l'équation (2) les valeurs de i' et A, on aura la valeur de la déviation D.

Les équations du prisme ont été établies *arithmétiquement* dans un cas particulier de figure, où le rayon incident et le rayon émergent sont situés du côté de la base du prisme par rapport aux normales correspondantes, et le rayon réfracté intérieur du côté du sommet. Or, si les situations relatives de ces diverses lignes viennent à changer, on retrouve toujours les mêmes types d'équations,

avec des changements de signe correspondant à ces changements de situations. Si donc on considère i et r, i' et r', comme *positifs* dans la situation relative qu'occupent les rayons, par rapport aux normales et à la base du prisme dans la figure 64, et comme *négatifs* dans le cas contraire, les formules précédentes, alors *algébriques*, sont absolument générales.

62. ***Cas d'un prisme de petit angle.*** — Si l'*angle du prisme* est *très petit*, et si l'*angle d'incidence* i n'est que d'un *petit nombre de degrés*, les angles r, r' et i' seront du même ordre de grandeur : on pourra alors remplacer les équations (3) et (4) par les équations $i = nr$, $i' = nr'$; en portant ensuite ces valeurs de i et de i' dans l'équation (2), on aura, en tenant compte de l'équation (1) :

$$D = (n - 1)\,A.$$

63. ***Conditions d'émergence.*** — Un rayon lumineux, tombant sous une incidence quelconque i sur la première face d'un prisme formé d'une substance plus réfringente que l'air, pénètre toujours dans le prisme (48); mais, pour que ce rayon émerge par la seconde face, il faut que son angle d'incidence r' soit inférieur à l'angle limite l de la matière du prisme par rapport à l'air. Or, puisque l'on a toujours pour tout rayon, $r + r' = A$, la plus petite valeur de r' correspond à la plus grande valeur de r. Mais la plus grande valeur que puisse prendre r est l, correspondant à $i = 90^o$; par suite, la plus petite valeur que puisse présenter r' est $A - l$. Si cette plus petite valeur est supérieure à l, c'est-à-dire si $A - l > l$, ou $A > 2\,l$, tous les rayons arrivant sur la seconde face du prisme éprouveront la réflexion totale, et seront rejetés vers l'intérieur. — Pour un prisme de verre, par exemple, l'angle limite du verre par rapport à l'air étant de 42°, si l'angle A du prisme est supérieur à 84°, l'émergence ne sera possible pour *aucun rayon*, quelle que soit son incidence sur la première face.

Si l'angle A du prisme est plus petit que $2l$, l'émergence sera possible pour tous les rayons dont l'incidence sur la première face sera comprise *entre l'incidence rasante, au-dessous de la normale, et une incidence i_0 telle que l'émergence ait lieu tangentiellement à la seconde face.* L'angle de réfraction dans la première face est alors $A - l$, et par suite

$$\sin i_0 = n \sin\,(A - l).$$

Pour $A = l$, $\sin i_0 = 0$; tout un quadrant de rayons est capable d'émerger. Pour $A < l$, $\sin i_0$ est négatif; cela signifie (61) que dans ce cas la condition d'émergence est satisfaite depuis $i = 90^o$ jusqu'à des rayons situés du même côté que le sommet par rapport à la normale au point d'incidence (i_0 négatif).

64. *Étude des variations de la déviation. — Variation de la déviation avec l'incidence. — Existence d'un minimum de déviation.* — Lorsqu'on veut faire des expériences avec un prisme, on ne se contente pas en général d'envoyer des rayons dans un seul plan de section principale. Cela ne donnerait, sur l'écran où l'on reçoit les rayons, qu'une simple trace lumineuse dans ce plan. Il est préférable d'envoyer des rayons à la fois dans plusieurs plans de section principale, de façon à obtenir une surface lumineuse d'une certaine étendue dans le sens de l'arête du prisme.

A cet effet, par une petite fente F (*fig.* 65), disposée dans le volet d'une chambre obscure, ou dans la paroi d'une lanterne de

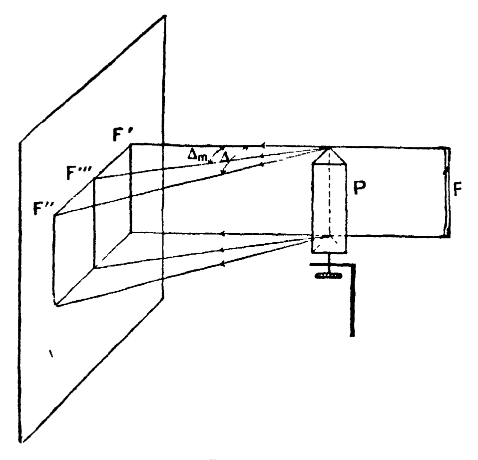


Fig. 65.

projection, faisons arriver un pinceau de lumière *monochromatique parallèle*, sur un prisme P dont l'arête est parallèle à la fente. Si l'on fait en sorte qu'une partie des rayons passe au delà de l'arête du prisme, on constate sur un écran la formation de deux taches lumineuses, l'une F' provient des rayons directs, l'autre F'' provient des rayons déviés. En faisant tourner le prisme P, au moyen d'un bouton, autour d'un axe parallèle à son arête, de manière que la déviation Δ diminue, on constate que la tache F'' ne se rapproche de F' que jusqu'à une certaine position F''' ; c'est donc là une position limite, qui correspond à un *minimum* de déviation Δ_m. — Lorsque le prisme est dans sa position correspondante au minimum de déviation, on constate, en outre, que les rayons incidents et les rayons déviés paraissent également inclinés sur les faces du prisme.

65. ***Démonstration géométrique de l'existence d'un minimum de déviation.*** — On peut démontrer géométriquement d'une façon simple l'existence de ce *minimum* de déviation, en utilisant la construction donnée plus haut (49), qui permet d'étudier la déviation $i - r$, dans le cas d'une seule réfraction. Décrivons une circonférence de rayon R (*fig.* 66) et sur un diamètre quelconque prenons un point P à la distance $OP = nR$ du centre de la circonférence, n étant l'indice du prisme. Menons de P deux sécantes PC et PB faisant respectivement avec PO des angles r et r' tels que $r + r' = A$, angle du prisme. D'après ce que nous avons vu (49), les angles

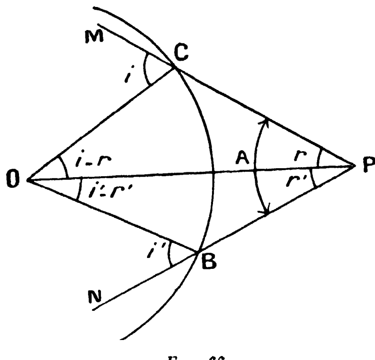


Fig 66.

MCO et NBO seront précisément les angles i et i' d'incidence et d'émergence du rayon qui traverse le prisme, et les angles COP et BOP seront les déviations partielles, $i - r$ à l'incidence et $i' - r'$ à l'émergence; la déviation totale D sera donc l'angle COB.

L'étude de la déviation dans le prisme, en fonction de l'incidence, reviendra donc à étudier les variations de l'arc CB intercepté sur la circonférence O par un angle constant $A = r + r'$ qui pivote autour de son sommet P.

Nous allons montrer que si $r = r' = \frac{A}{2}$, c'est-à-dire que si PO est bissectrice de CPB, l'arc CB est plus petit que pour toute autre position de l'angle constant A dans son mouvement de rotation autour de P.

Soit en effet l'angle CPB (*fig.* 67) tel que PO est sa bissectrice; envisageons l'angle A dans une autre position quelconque C'PB' telle que l'angle OPB' soit plus petit que OPB; il faut établir que

$$\text{arc } CB < \text{arc } C'B'.$$

Puisque l'angle CPB est égal à C'PB', il en résulte que

$CPC' = BPB'$. En passant de la position CB à la position C'B', la

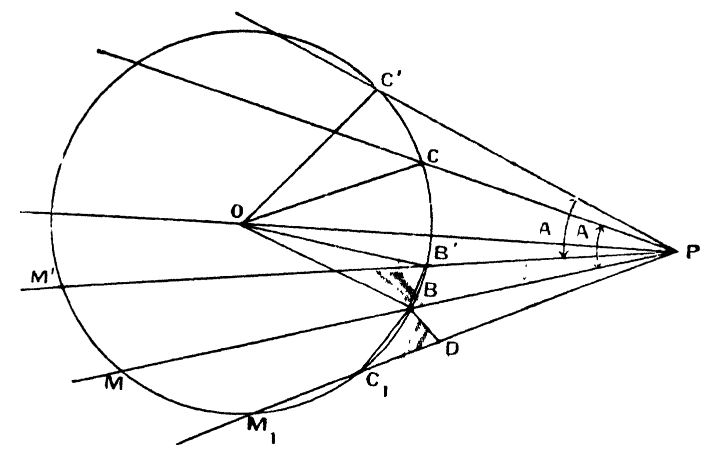


Fig. 67.

déviation a augmenté de l'arc CC' et diminué de l'arc BB'; tout revient à montrer que

$$\text{arc } BB' < \text{arc } CC';$$

Plions la figure le long de PO; C' vient en C_1, C vient en B, et l'on a

$$\text{arc } BC_1 = \text{arc } CC',$$

portons, sur PC_1, une longueur $PD = PB'$, et joignons C_1B et BD; PB est bissectrice de l'angle $B'PC_1$, car

$$BPB' = CPC' = BPC_1;$$

donc BD = corde BB'.

Or, l'angle D du triangle BDC_1 est égal à l'angle M'B'B, qui a pour mesure $\frac{\text{arc } BC_1M'}{2}$; l'angle C_1 du même triangle a pour mesure $\frac{\text{arc } BC_1M_1}{2}$, et l'on a évidemment

$$\text{arc } BC_1M' > \text{arc } BC_1M_1,$$

car le point B est nécessairement entre B' et C_1 (PB est bissectrice de $B'PC_1$); donc, dans le triangle BC_1D, on a $BD < BC_1$, puisque les plus grands côtés sont opposés aux plus grands angles; mais BD = BB', donc

$$\text{corde } BB' < \text{corde } BC_1$$

et par suite

$$\text{arc } BB' < \text{arc } BC_1,$$

ou, puisque arc $BC_1 =$ arc CC', on a finalement

$$\text{arc } BB' < \text{arc } CC'.$$

C. Q. F. D.

Cette démonstration géométrique est une conséquence de la loi du sinus. On peut donc dire que la démonstration expérimentale du minimum de déviation du prisme est une *très importante confirmation de la loi de Descartes.*

66. ***Variation de la déviation avec l'indice.*** — Les formules du prisme (6!) permettent de prévoir très simplement l'influence de l'indice de réfraction n : en effet i' et A étant fixes, si n augmente, r diminue d'après la relation (3) ; mais, si r diminue, r' augmente d'après la relation (1), et si r' et n augmentent, i' augmente d'après la relation (4). Donc, *si n croît,* D *doit augmenter.*

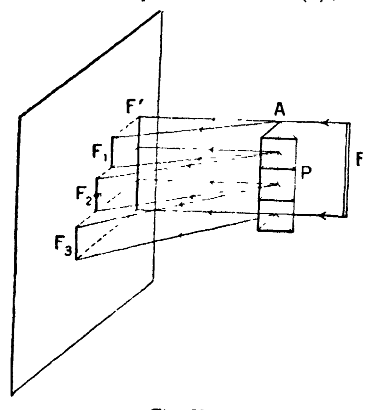


Fig. 68.

On vérifie expérimentalement que la déviation varie avec n, à l'aide d'un *polyprisme* (*fig.* 68), formé de petits prismes de même angle A, de substances différentes, et superposés de façon à constituer un prisme unique. Une fente lumineuse F, parallèle à l'arête réfringente commune, envoie de la lumière monochromatique parallèle dans les plans de section principale de ces divers prismes, et l'on fait en sorte qu'une partie de la lumière passe au delà de l'arête. On obtient alors sur un écran la tache lumineuse directe F', et des taches déviées F_1, F_2, F_3 dont les déviations sont différentes pour chacun des prismes. Si l'on connaît le sens des variations des indices des matières de ces prismes, on constate que la déviation est d'autant plus grande que n est plus grand.

67. ***Variation de la déviation avec l'angle du prisme.*** — Les formules du prisme permettent de prévoir l'influence de l'angle A du prisme : en effet, si i et n sont fixes, r est fixe d'après la relation (3) ; si A augmente, r' augmente de la même quantité d'après la relation (1) ; mais si r' augmente, i' augmente d'après la relation (4), et il augmente plus que r', comme nous le savons (49), dans le cas de $n > 1$, le seul cas pratique dont nous nous occuperons. Donc $i' - A$ augmente quand A augmente, puisque i' augmente plus que A ; donc enfin, *si* A *augmente,* D doit *augmenter.*

On le vérifie expérimentalement au moyen du *prisme à angle variable* (*fig.* 69), formé d'une auge limitée par deux plaques de

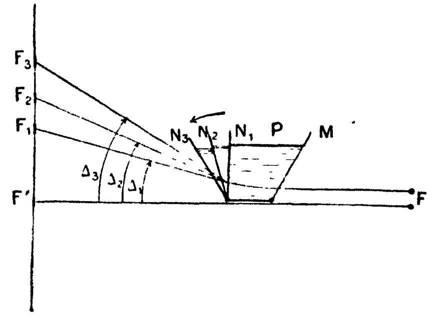


Fig. 69

verre mobiles autour de charnières parallèles. On remplit ce prisme d'eau, et l'on y fait tomber de la lumière monochromatique, transmise par une fente horizontale F parallèle à son arête : on obtient sur un écran une tache lumineuse directe F' et une tache déviée F_1. On constate alors que, pour une même valeur de i (face antérieure fixe), la tache déviée passe de F_1 à F_2, puis à F_3, à mesure qu'on incline la seconde face, de N_1 à N_2 et à N_3 : la déviation augmente donc quand on fait croître l'angle formé par les deux faces du prisme. — Il peut d'ailleurs se faire que, pour une certaine valeur de cet angle A, l'émergence cesse de se produire; c'est lorsque $A - r$ devient supérieur à l'angle limite l; il y a alors *réflexion totale* sur la seconde face du prisme(*).

68. ***Vision des objets à travers un prisme. — Images nettes au minimum de déviation.*** — Quand on regarde un objet tel que la flamme d'une bougie B à travers un prisme A (*fig.* 70), on en aperçoit une image virtuelle B', déplacée *du côté de l'arête*. Cette image, en général, manque de netteté, ou présente des déformations. Cela prouve que le prisme ne donne généralement pas de bonnes images des objets. En outre, si la lumière émise par l'objet n'est pas monochromatique, l'image offre des contours irisés, qui nuisent encore à sa netteté. A ce point de vue, on l'améliore déjà en interposant un verre rouge. Si, de plus, on tourne le prisme de façon à faire varier l'angle moyen d'incidence, on constate que

(*) Il est facile de réaliser, avec cet appareil, les conditions pour qu'il y ait nécessairement *réflexion totale* sur la seconde face du prisme (65). En effet, l'angle limite du passage de l'eau dans l'air est, comme il a été dit, de 48° (50). Or le prisme à angle variable permet en général de réaliser un angle de 100°, c'est-à-dire supérieur à $2l$ ou 96°, condition nécessaire pour qu'il y ait, à la face d'émergence, réflexion totale pour tout rayon ayant pénétré dans le prisme.

l'image devient *nette* lorsqu'elle est *au minimum de déviation*: elle paraît alors *égale à l'objet*, et située *à la même distance du prisme*. — D'ailleurs, s'il en est bien ainsi, l'on doit constater réciproquement, d'après la loi du retour inverse de la lumière, que le prisme donne, d'un objet lumineux *virtuel*, une image *réelle*, qui n'est parfaitement nette qu'au minimum de déviation. C'est en effet ce qu'il est facile de mettre expérimentalement en évidence, au moyen d'une lentille auxiliaire et d'un verre rouge : l'image est bien alors égale à l'objet, et située à la même distance du prisme.

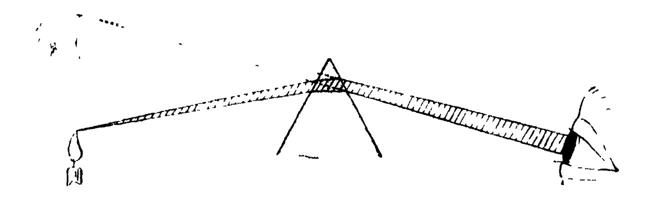


Fig 70

C'est là une importante propriété, corrélative du minimum de déviation, dont nous aurons à faire usage plus tard dans l'étude de la dispersion.

69 *Application du minimum de déviation à la mesure expérimentale des indices de réfraction.* — Dans le cas du minimum de déviation, il existe une relation simple entre la valeur de la déviation minimum D_m, l'angle du prisme A, et son indice de réfraction n. — Soient en effet i_m la valeur commune de i et i' au minimum de déviation, et r_m celle de r et r'. Les formules du prisme (61) deviennent alors :

$$2\,r_m = A, \quad D_m = 2\,i_m - A, \quad \sin i_m = n \sin r_m.$$

Des deux premières, on tire

$$r_m = \frac{A}{2}, \quad i_m = \frac{D_m + A}{2},$$

et, en portant dans la troisième, résolue par rapport à n, on obtient :

$$n = \frac{\sin \dfrac{D_m + A}{2}}{\sin \dfrac{A}{2}}.$$

Telle est la relation dont on fait usage pour la mesure expérimentale des indices de réfraction des diverses substances, car les deux angles A et D_m sont tous deux faciles à mesurer. — Lorsqu'il s'agit

d'un corps solide, on taille deux faces planes formant un angle réfringent, sur lequel on reçoit un faisceau de lumière parallèle : on cherche, par tâtonnements, quelle est la position pour laquelle on obtient la *déviation minimum*. Puis on mesure la déviation D_m et l'angle A des deux faces, au moyen d'appareils spécialement construits pour cet usage (goniomètres); la relation précédente permet alors de calculer *n*. — Lorsqu'il s'agit d'un corps liquide, on le place dans un prisme creux, limité par des lames de verre à faces parallèles, qui n'ont pas d'influence sur la déviation.

Le tableau suivant donne les valeurs numériques des indices usuels moyens pour diverses substances solides et liquides, et des indices absolus pour quelques gaz, dans les conditions normales.

SOLIDES		LIQUIDES		GAZ (0° et 76 cm) INDICES ABSOLUS	
Diamant	2,46	Alcool	1,36	Air	1,000292
Flint d'Iéna (ord.). .	1,61	Benzène.	1,50	Azote	1,000289
Glace (eau solide). .	1,31	Chloroforme . . .	1,44	Chlore	1,000770
Phosphore	2,09	Eau.	1,33	Gaz carbonique	1,000454
Sel gemme.	1,54	Glycérine.	1,47	Hydrogène	1,000139
Soufre	2,04	Phénol	1,55	Oxyde de carbone. .	1,000335
Verre ordinaire. .	1,53	Sulfure de carbone	1,63	Oxygène	1,000272

IV. — Lentilles sphériques minces : étude expérimentale.

70. ***Définition.*** — On nomme *lentilles sphériques*, des masses transparentes, généralement en verre, et limitées par deux surfaces

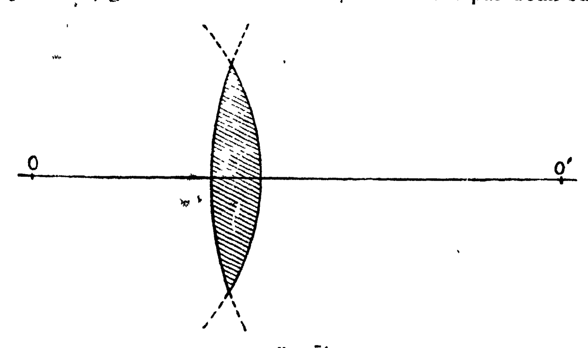


Fig. 71

sphériques (*fig.* 71), ou par une surface sphérique et une surface plane. Nous les distinguerons en deux groupes :

1° Les lentilles *à bords minces*, dont l'épaisseur est croissante depuis les bords jusqu'au milieu. Ces lentilles sont aussi désignées

sous le nom de lentilles *convergentes*, qui indique, comme on le verra plus loin, leur propriété essentielle. — Elles comprennent trois variétés : la lentille *biconvexe* A (*fig.* 72), la lentille *plan-convexe* A′, et le *ménisque convergent* A″.

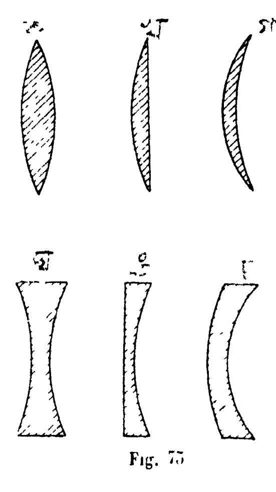


Fig. 73

2° Les lentilles *à bords épais*, dont l'épaisseur diminue depuis les bords jusqu'au milieu : on les désigne sous le nom de lentilles *divergentes*. — Ces lentilles comprennent encore trois variétés : la lentille *biconcave* B (*fig.* 73), la lentille *plan-concave* B′, et le *ménisque divergent* B″.

On appelle *axe principal* d'une lentille, la droite qui passe par les centres O et O′ (*fig.* 71) des deux faces sphériques. Si l'une des deux faces est plane, l'*axe principal* est la perpendiculaire menée du centre de la face sphérique sur la face plane. L'axe principal est l'axe de révolution de la lentille. — Tout plan mené par l'axe principal est un plan de symétrie de la lentille, qu'on appelle plan de *section principale*. Un rayon incident situé dans un plan de section principale y reste par réfraction. Le diamètre de base des calottes sphériques terminales est appelé le *diamètre d'ouverture* de la lentille.

71. ***Étude expérimentale des lentilles convergentes minces. — Plans focaux et foyers principaux réels.*** — Lorsqu'on prend une lentille *à bords minces*, par exemple une lentille biconvexe, et qu'on l'oriente de façon que son axe principal soit dirigé vers le centre du Soleil, on constate que les faisceaux de rayons solaires, après réfraction, convergent en arrière de la lentille où ils forment une petite image circulaire du Soleil, dont les bords ne sont parfaitement nets que si l'on place le petit écran destiné à la recevoir dans un plan perpendiculaire à l'axe principal, à l'endroit où la tache lumineuse est la plus petite possible.

Puisque c'est seulement dans ce plan que l'image du Soleil est parfaitement nette, c'est dans ce plan que viennent exactement converger, après leurs réfractions, les différents faisceaux cylindriques émanant des divers points du Soleil, et dont les extrêmes forment entre eux, comme nous le savons, un angle de 32 minutes. Ce plan constitue donc un *premier plan focal* de la lentille. Or, si un point situé sur l'axe principal a une image, cette image est nécessairement aussi sur l'axe principal, par raison de symétrie. Donc, en par-

ticulier, les rayons parallèles à l'axe principal, qui proviennent d'un point situé à l'infini sur cet axe, convergent au point où l'axe principal perce le plan focal. Ce point F_2 (*fig.* 74) est ce qu'on nomme un *foyer*

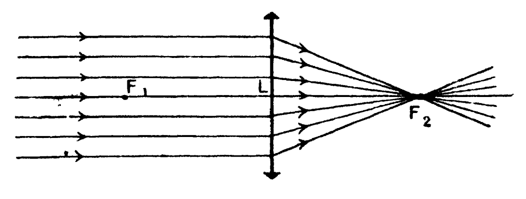


Fig. 74.

principal, ou simplement un *foyer* de la lentille. Sa distance à la lentille est la *distance focale* de cette lentille, quantité qu'il importe de mesurer. — Pour tracer la marche d'un rayon quelconque parallèle à l'axe principal, si la lentille est *supposée très mince*, on peut supposer que chaque rayon, au lieu d'éprouver deux réfractions successives, l'une à l'entrée, l'autre à la sortie de la lentille, n'en éprouve qu'une, au point où il rencontre le diamètre d'ouverture. C'est ce qu'on a supposé dans la figure 74, et c'est ce que nous ferons dans toutes les constructions de ce genre, en supposant toujours la lentille très mince. On peut alors figurer une lentille convergente mince par un simple trait L (*fig.* 74), représentant son diamètre d'ouverture dans le plan de section principale de la figure, et l'on indique par les bords que la lentille est à bords minces.

Il est facile de se rendre compte, d'après les lois de la réfraction, de cette action exercée par une lentille *biconvexe* sur les rayons qui la rencontrent parallèlement à son axe principal. Soit SI l'un

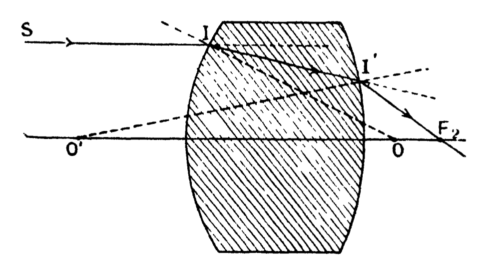


Fig. 75.

de ces rayons (*fig.* 75); il éprouve, en pénétrant dans le verre, une première réfraction, suivant II', qui le rapproche de la normale menée au point d'incidence, c'est-à-dire du rayon de courbure OI.

En sortant de la lentille, il éprouve une seconde réfraction, et s'écarte de la normale en I', c'est-à-dire du rayon de courbure O'I'. Ces deux réfractions successives ont pour effet, l'une et l'autre, de *ramener le rayon lumineux vers l'axe principal*, et, comme le rayon incident était parallèle à l'axe, le rayon émergent I'F_2 viendra nécessairement rencontrer cet axe en un certain point F_2, situé *au delà de la lentille*(*).

Réciproquement, si l'on change le sens de propagation de la lumière, et si l'on considère un point lumineux *réel*, placé au foyer principal F_2 et envoyant de la lumière sur la lentille, d'après la loi du retour inverse, le faisceau conique de rayons qu'il émet est transformé en un faisceau cylindrique parallèle à l'axe principal.

Par retournement de la lentille, face pour face, par rapport au Soleil, c'est-à-dire en changeant le sens de propagation de la lumière par rapport à la lentille, on trouve, de l'autre côté de cette lentille, un *second plan focal* et par suite un *second foyer principal* F_1 (*fig.* 74), avec la *même valeur de la distance focale*, si la lentille est de faible épaisseur.

C'est cette propriété de faire converger un faisceau de rayons parallèles à l'axe, commune aux trois variétés de lentilles minces à bords minces, A, A' et A'' (*fig.* 72), qui leur fait donner le nom de lentilles *convergentes*.

72. ***Foyer-image et foyer-objet.*** — Il importe de bien remarquer que, *pour un sens donné de propagation de la lumière*, les deux foyers réels d'une lentille convergente jouent, dans la lentille, des rôles bien différents.

Le foyer F_2 (*fig.* 76), qui est situé du côté opposé à celui d'où vient la lumière, est le point où vont converger les rayons parallèles à l'axe principal; c'est l'image d'un point lumineux situé à l'infini sur l'axe; on l'appelle le *foyer-image*. L'autre foyer F_1 situé du côté d'où vient la lumière, est la position qu'il faut donner à un point lumineux pour que son image soit à l'infini, c'est-à-dire pour que les rayons ré-

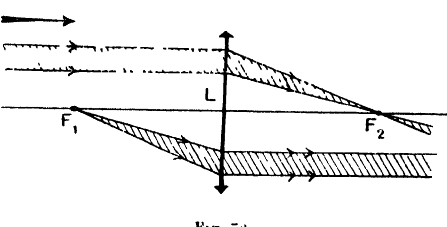


Fig. 76.

(*) C'est, du reste, ce dont on peut encore se rendre compte, en observant que la lentille agit sur le rayon SI comme le ferait un prisme de verre dont les faces se confondraient avec les plans tangents menés en I et en I'; la base de ce prisme se trouvant toujours, par suite de la forme même de la lentille, du côté de l'axe principal, le rayon est toujours dévié vers cette région (59).

fractés soient parallèles à l'axe principal. C'est le *foyer-objet*. Si l'on changeait le sens de propagation de la lumière, les rôles des deux foyers s'intervertiraient : le foyer-objet deviendrait le foyer-image, et réciproquement.

73. ***Conditions générales pour obtenir de bonnes images. — Plans conjugués.*** — L'étude expérimentale que nous allons faire des conditions générales nécessaires pour obtenir de *bonnes* images, c'est-à-dire des *images nettes*, et *semblables aux objets*, sera calquée sur celle que nous avons déjà faite à propos des miroirs sphériques concaves (27).

Lorsqu'on place devant une lentille convergente L (*fig.* 77), à une distance un peu plus grande que sa distance focale, une source lumineuse de faibles dimensions B, comme la flamme d'une bougie, d'un bec de gaz, etc., l'expérience montre que l'on obtient derrière la lentille une image réelle B', que l'on peut rendre visible de tout

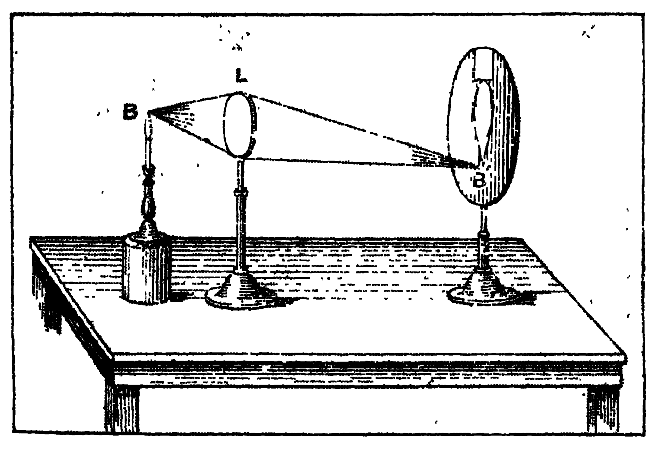


Fig. 77

point de l'espace au moyen d'un écran diffusant. Le cône de rayons qui émane d'un point-objet est donc transformé, par la réfraction, en un nouveau cône qui converge au point-image. Lorsque l'écran est exactement dans le plan où se forme l'image, celle-ci présente un maximum de netteté; on dit qu'elle est *au point* sur l'écran. Or, si l'objet lumineux est placé au voisinage de l'axe principal, mais si la lentille a des dimensions transversales trop considérables par rapport à la distance focale, c'est-à-dire si le diamètre d'ouverture est trop grand, on trouve que l'image n'est jamais absolument nette sur l'écran. On améliore beaucoup la qualité de l'image en diaphragmant la lentille, c'est-à-dire en supprimant la région

voisine des bords au moyen d'un écran de carton, et en ne conservant que la partie centrale. Si l'on supprime au contraire cette partie centrale, on trouve que la portion marginale de la lentille donne également naissance à une image assez nette, mais un peu plus rapprochée de la lentille que l'image donnée par la région centrale. On comprend dès lors pourquoi l'image donnée par la lentille tout entière n'était pas nette : c'est que les rayons centraux et les rayons marginaux provenant d'un même point de l'objet convergent en des points différents. Donc, la *première condition* de netteté des images est *que le diamètre d'ouverture de la lentille soit faible*, non pas d'une façon absolue, mais par rapport à la distance focale. L'angle sous lequel, du foyer principal, on aperçoit le diamètre d'ouverture ne doit pas dépasser une vingtaine de degrés. En d'autres termes, le rapport du diamètre d'ouverture à la longueur focale doit rester petit. Le rapport du *rayon* d'ouverture à la longueur focale est désigné sous le nom de *raison d'ouverture*; ce rapport ne doit jamais dépasser 1/5.

Cette première condition supposée remplie, si l'on vient à écarter peu à peu l'objet lumineux de l'axe principal, on constate que l'image s'en écarte de l'autre côté, mais qu'elle perd de sa netteté, pour finir même par disparaître complètement. Les objets doivent donc rester dans le voisinage de l'axe principal, et il en résulte que l'objet ne doit pas être de trop grandes dimensions, car, s'il en était ainsi, les bords de l'objet se trouveraient forcément éloignés de l'axe principal, et les bords de l'image pourraient ne pas être nets. — Cependant si un objet de grandes dimensions est très éloigné de la lentille, son image peut redevenir nette dans toute son étendue. La netteté de l'image ne dépend donc pas tant des dimensions absolues de l'objet que de l'angle sous lequel ces dimensions sont vues du sommet de la lentille. A mesure que cet angle diminue, la netteté reparaît. — La *seconde condition* de netteté des images est donc *que les objets soient vus de la lentille sous un angle assez faible.*

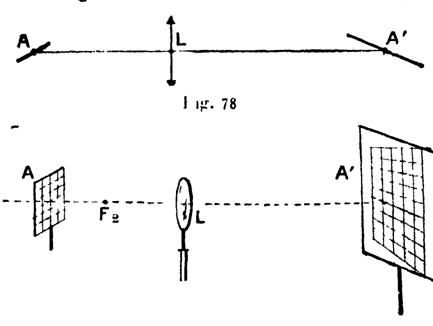


Fig. 78

Fig. 79.

Enfin, lorsqu'on place un objet A (*fig.* 78) d'assez grandes dimensions (un quadrillage (*fig.* 79), tracé sur une plaque de verre, par

exemple), très obliquement par rapport à l'axe principal, au lieu de le centrer perpendiculairement, on constate que, sur l'écran A' orienté convenablement, l'image la plus nette possible n'est plus semblable à l'objet; elle est déformée comme l'indique la figure 79.

La *troisième condition* pour obtenir de bonnes images, est donc *que les objets, supposés plans, soient perpendiculaires à l'axe principal.* Les plans perpendiculaires à l'axe, et contenant au voisinage de cet axe l'objet et l'image nette, sont appelés *plans conjugués.*

74. *Positions et grandeurs relatives de l'objet et de l'image dans les diverses positions des plans conjugués.* — Pour achever l'étude expérimentale des lentilles convergentes, il nous reste à examiner

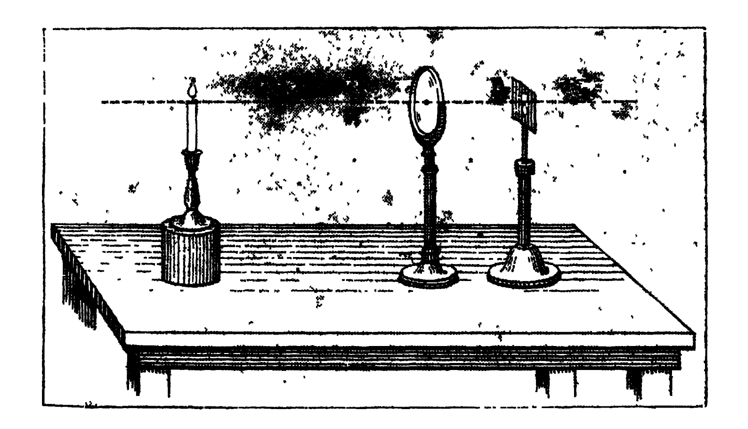


Fig. 80.

ce qui se passe lorsqu'on place l'objet lumineux sur l'axe à *diverses distances* de la lentille.

Dans les différents cas qui vont suivre, F_1 et F_2 désigneront les foyers principaux équidistants de la lentille : F_2 sera le *foyer image;* F_1 le *foyer-objet;* la distance $LF_2 = f$ sera la *distance focale principale* de la lentille. Enfin nous désignerons par H_1 et H_2 les points situés sur l'axe principal à une distance de la lentille *double de la distance focale.*

1° *Objet situé au delà de* H_1. — Lorsque l'objet est à une distance de la lentille supérieure à $2f$ (*fig.* 80), l'expérience montre que l'image est *réelle, renversée, plus petite que l'objet.* Si l'on mesure sa distance à la lentille, on trouve qu'elle est comprise entre f et $2f$; elle est donc située entre F_2 et H_2.

2° *Objet en* H_1. — Si l'objet est à une distance de la lentille égale

à $2f$ (*fig.* 81), l'expérience montre que l'image est *réelle*, *renversée*,

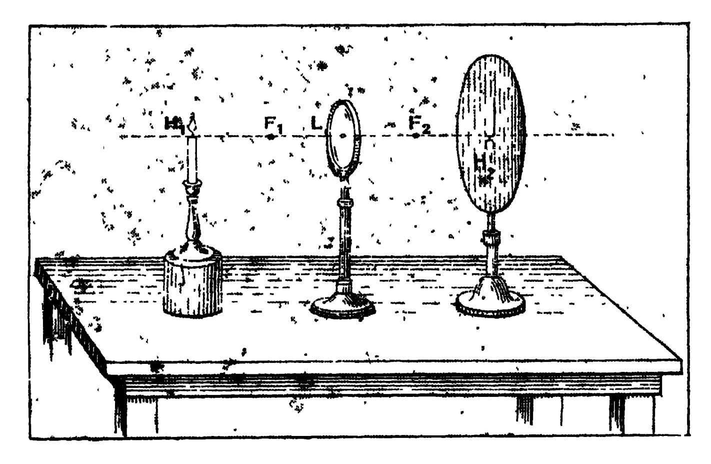


Fig. 81.

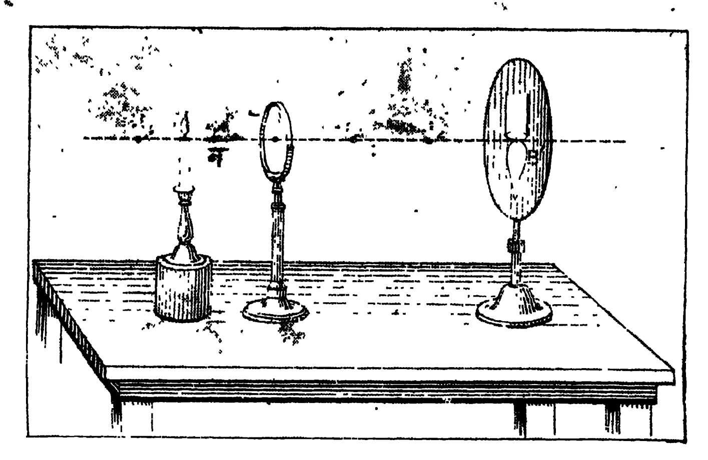


Fig. 82.

égale à l'objet, et qu'elle est à la distance $2f$ de la lentille, c'est-à-dire en H_2.

3° *Objet entre* H_1 et F_1. — L'image *réelle*, *renversée*, est située au delà de H_2 (*fig.* 82) et elle est *plus grande* que l'objet.

4° *Objet en* F_1 — Il n'y a plus d'image. On dit que l'image s'est éloignée et qu'elle a grandi indéfiniment.

5° *Objet entre* F_1 *et la lentille* L. — Dans ce cas, on ne trouve plus d'image réelle; mais l'œil placé de l'autre côté de la lentille aperçoit une image *virtuelle, droite* et *agrandie* (*fig.* 83), qui se rapproche de la lentille en même temps que l'objet, et arrive contre la lentille avec l'objet.

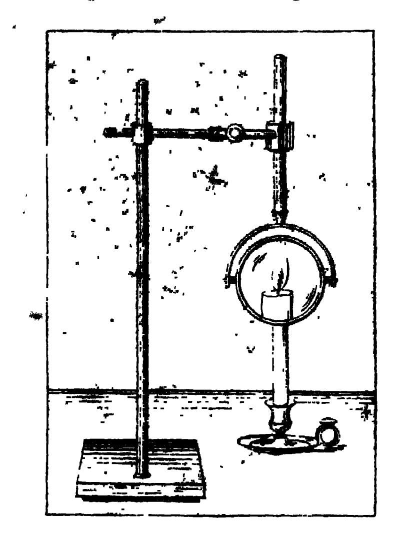


Fig. 83.

6° *Objet virtuel.* — Pour obtenir un objet virtuel, on peut opérer comme il suit : une première lentille convergente *l* (*fig.* 84) donne de la bougie B une image réelle B' et l'on empêche la formation de cette image en interposant la lentille L. L'image B' joue, par rapport à la lentille L, le rôle d'objet lumineux virtuel, et l'on obtient une image définitive B", *réelle*, de *même sens que* B', *plus*

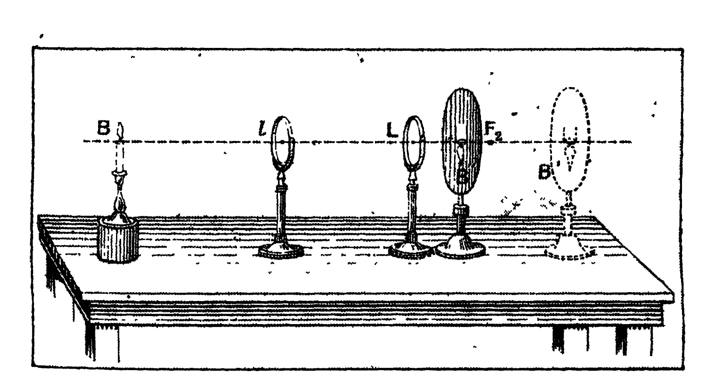


Fig. 84.

petite qu'elle, et située à une distance de L inférieure à *f*, c'est-à-dire entre L et F_2.

Ces divers résultats expérimentaux sont résumés dans le tableau suivant :

OBJET	IMAGE
Objet réel de l'∞ en avant, à H_1.	Image réelle, de F_2 à H_2, renversée, plus petite que l'objet.
Objet réel de H_1 à F_1.	Image réelle, de H_2 à l'∞ en arrière, renversée, plus grande que l'objet.
Objet réel de F_1 à L.	Image virtuelle, de l'∞ en avant à L, droite, plus grande que l'objet.
Objet virtuel de L à l'∞ en arrière.	Image réelle de L à F_2, droite, plus petite que l'objet.

Nous voyons ainsi que, lorsque l'objet a parcouru tout l'axe principal, depuis l'infini en avant jusqu'à l'infini en arrière, l'image a aussi parcouru tout l'axe, en marchant dans le *même sens que l'objet*, depuis le foyer image F_2 jusqu'à l'infini en arrière, pour revenir de l'infini en avant à son point de départ F_2.

75. ***Construction géométrique de l'image, et marche d'un pinceau de rayons lumineux.*** — En partant des notions expérimentales qui précèdent, et qui montrent, d'une part, *l'existence des foyers principaux, de positions connues,* d'autre part, *l'existence des plans conjugués*, on peut construire géométriquement l'image d'un objet, donnée par une lentille convergente, d'épaisseur supposée négligeable, en ne faisant usage que de la *règle* et de l'*équerre*. En effet, on peut raisonner comme s'il ne se produisait, pour chaque rayon, qu'un seul changement de direction, au point où ce rayon rencontre le diamètre d'ouverture de la lentille. Soit donc un

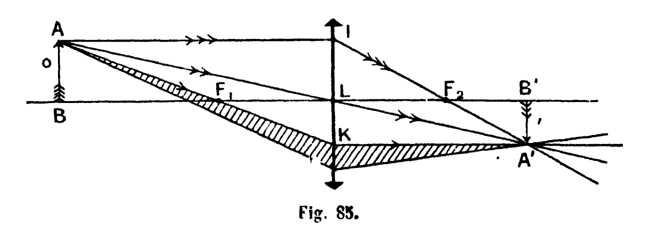


Fig. 85.

objet AB (*fig.* 85) perpendiculaire à l'axe principal d'une lentille dont les foyers principaux sont en F_1 et F_2 ; il suffit d'avoir l'image A′ de A pour avoir l'image A′B′ de AB. Or, le rayon AI parallèle à l'axe principal vient passer, après réfraction, par le foyer F_2. Le rayon mené suivant AF_1 devient, après réfraction en K, parallèle à l'axe principal. Le point de rencontre de ces deux rayons donne le point A′, et par suite l'image A′B′. Il est alors facile de tracer la marche d'un pinceau lumineux partant de A et qui vient converger en A′ (le pinceau marqué par les hachures sur la figure 85).

76. ***Centre optique. — Axes secondaires.*** — Pour toute lentille

sphérique, il existe un point fixe, appelée *centre optique*, situé sur l'axe, et jouissant de cette propriété que *tout rayon lumineux qui vient passer par ce point sort de la lentille sans déviation.* — Dans le cas d'une lentille d'épaisseur négligeable, nous établirons un peu plus loin (90) que le centre optique est le point où cette lentille coupe son axe.

On appelle *axe secondaire*, toute droite passant par le centre optique; une pareille droite représente un rayon *non dévié* par la lentille.

77. ***Application de la propriété du centre optique à la construction d'une image.*** — Connaissant la propriété et la position du centre optique, on peut les faire servir à la construction géométrique de l'image A'B' d'un objet AB, c'est-à-dire du foyer A' conjugué de A. Il suffit de tracer l'axe secondaire AL (*fig.* 85), et le rayon AI parallèle à l'axe, qui se réfracte ensuite suivant IF_2; le point de rencontre de AL et de IF_2 donne le point A' cherché.

Construisons encore, par exemple, l'image du Soleil donnée par une lentille convergente. Dans ce cas, la construction habituelle serait en défaut, car tous les rayons émanant d'un même point sont parallèles. Mais le plan dans lequel se fait l'image est connu; un seul rayon suffit donc pour obtenir l'image d'un point, et le plus simple de ces rayons nous est fourni par l'axe secondaire. Supposons que l'axe principal F_2L (*fig.* 86) aille passer par le centre S du Soleil. Le bord supérieur S', situé dans le plan de section princi-

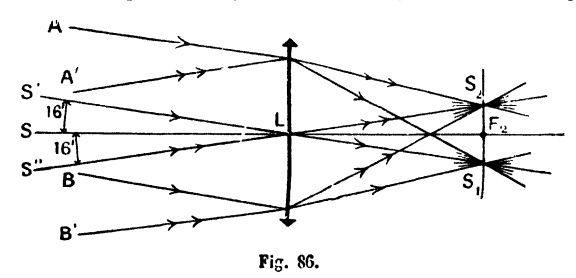


Fig. 86.

pale de la figure, envoie sur la lentille un cylindre AS'B de rayons faisant un angle de 16' (fort exagéré sur la figure) avec l'axe principal. Le bord inférieur S'' envoie un autre cylindre A'S''B', faisant également un angle de 16' avec l'axe en sens opposé. Ces deux cylindres sont transformés en cônes par la réfraction, les sommets de ces cônes étant situés dans le plan focal F_2, aux points S_1 et S_2 où les axes secondaires S'L et S''L de ces faisceaux percent le plan focal. L'image du Soleil est donc un petit cercle de diamètre S_1S_2. Un calcul identique à celui qui a été fait à propos d'un miroir

concave (29) donnerait pour valeur approchée de ce diamètre $\frac{f}{100}$.

78. ***Discussion géométrique de la position, de la nature, du sens et de la grandeur de l'image d'un objet.*** — On peut appliquer la construction précédente pour déterminer la position et la grandeur de l'image d'un objet, dans les divers cas, et l'on retrouve tous les résultats qui viennent d'être établis expérimentalement.

1° Considérons d'abord un objet AB (*fig.* 87), placé *à une distance plus grande que le double de la distance focale principale*, c'est-à-dire à une distance du centre optique L plus grande que LH_1. — Pour construire géométriquement l'image du point A, menons l'*axe secondaire* ou *rayon sans déviation* ALA'; puis le rayon AI

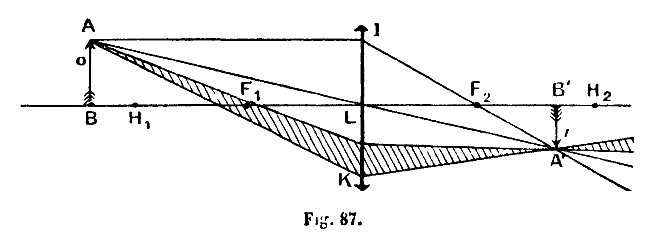


Fig. 87.

parallèle à l'axe principal, qui prend, après réfraction, une direction IF_2 passant par le foyer principal F_2 : l'intersection de ces deux droites détermine le point A', qui est l'image du point A. — L'image de l'objet AB est la perpendiculaire A'B' abaissée sur l'axe. — On voit que l'image est *renversée*. — Dans le cas actuel, où la distance LB est plus grande que LH_1, la distance LB' est, par construction, plus petite que LH_2; par suite l'*image est plus petite que l'objet*, comme on l'a établi plus haut par l'expérience. — Si l'objet arrive à une distance LH_1 *égale au double de la distance focale principale*, l'image se forme à une distance LH_2 égale à LH_1, et devient *égale à l'objet.*

2° Si l'objet est placé à une distance *inférieure au double de la distance focale principale*, mais *supérieure à la distance focale* LF_1, l'image, toujours réelle et renversée, se forme au delà du point H_2, et devient *plus grande que l'objet.* Ce sont les conditions réciproques des précédentes : c'est dans ces conditions qu'est faite l'expérience représentée par la figure 82. — Si l'objet arrive *à la distance focale principale* LF_1, il ne se forme plus d'image à distance finie. De même que dans les miroirs sphériques, on dit que l'image est *à l'infini, et infiniment agrandie.* Une telle image serait visible pour un œil qui recevrait les faisceaux parallèles de

rayons réfractés, dans les mêmes conditions qu'il reçoit les faisceaux solaires.

3° Il reste à examiner le cas où l'objet réel AB est placé à une distance *moindre que la distance focale principale* LF_1 (*fig.* 88). — La même construction montre que le rayon AI, parallèle à l'axe principal, donne un rayon réfracté IF_2 qui ne peut pas rencontrer l'axe secondaire AL au delà de la lentille; mais les prolongements géométriques de ces deux droites se rencontrent en A', du même côté que l'objet, et au delà de A. Les rayons émanés de A forment

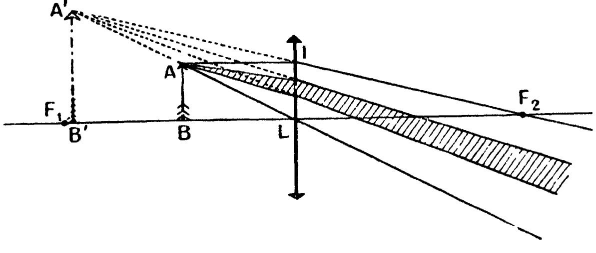


Fig. 88.

donc, au sortir de la lentille, un faisceau *divergent* : si ce faisceau vient rencontrer l'œil, il paraît émané du *foyer conjugué virtuel* A'. — L'image de l'objet AB est la perpendiculaire A'B' abaissée sur l'axe; cette image est *droite, virtuelle* et *plus grande que l'objet*. — Une pareille image ne peut venir se peindre sur un écran; elle ne peut être perçue que par un observateur placé de manière à recevoir les faisceaux divergents. La lentille fonctionne alors comme une *loupe*; nous reviendrons plus loin sur ce sujet (112).

4° On peut enfin considérer le cas d'un *objet virtuel*; c'est ce qu'on réalise, par exemple, en employant une lentille auxiliaire convergente, donnant une image réelle d'un objet matériel, et en

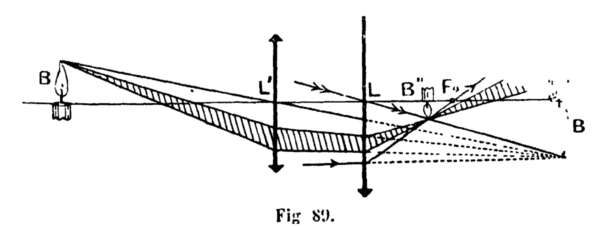


Fig 89.

interposant la lentille étudiée de façon à empêcher la formation de cette image, qui joue ainsi par rapport à elle le rôle d'un objet virtuel. Dans la figure 89, l'image réelle B' de la bougie B, fournie

par la lentille auxiliaire convergente L′, joue le rôle d'objet virtuel par rapport à la lentille convergente L, qui en donne l'image *réelle* définitive B″, *de même sens* que B′, *plus petite*, et située entre L et F_2.

On a construit l'image de l'extrémité de la flamme B″, en considérant le rayon parallèle à l'axe principal commun qui irait passer par l'extrémité de la flamme B′, rayon qui se réfracte en passant par le foyer F_2; puis l'axe secondaire LB′ de ce même point par rapport à la lentille L. — La marche complète d'un pinceau lumineux est indiquée par des hachures.

Remarque. — Il résulte de toutes ces constructions, qu'une lentille convergente rend toujours plus convergent un faisceau qui l'est déjà (4°), et que, si elle ne fait pas toujours converger un faisceau divergent (3°), elle le rend toutefois moins divergent Une telle lentille mérite donc bien l'épithète de *convergente*, qui lui a été primitivement donnée relativement à son action sur un faisceau de rayons parallèles.

79. ***Étude expérimentale des lentilles divergentes minces. — Plans focaux et foyers principaux virtuels.*** — Prenons une lentille *à bords épais*, telle que B, B′ ou B″ (*fig.* 73), et orientons-la de façon que son axe principal passe par le centre du Soleil : l'expérience montre qu'il sort de la lentille un faisceau *divergent*. — L'œil d'un observateur placé dans ce faisceau voit un petit cercle lumineux, situé *du côté où la lentille reçoit la lumière*. Le plan de ce petit cercle, perpendiculaire à l'axe principal, est un

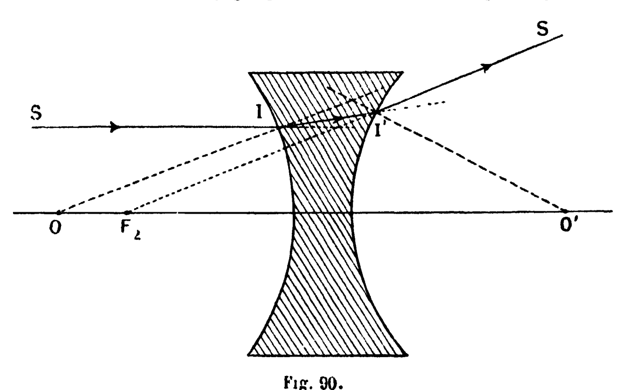


Fig. 90.

plan focal virtuel; le centre de ce cercle est un *foyer principal virtuel* de la lentille; c'est le *foyer-image*.

Voici comment on peut se rendre compte de ce résultat pour une lentille *biconcave*. — Soit un rayon SI (*fig.* 90), tombant sur une

telle lentille, dans une direction parallèle à son axe principal OO'. Ce rayon éprouve, en pénétrant dans le verre, une première réfraction, qui le rapproche de la normale OI, suivant II'; en sortant de la lentille, il éprouve une seconde réfraction, qui l'éloigne de la normale O'I', et prend la direction I'S'. Ces deux réfractions, ont pour effet, l'une et l'autre, *d'écarter le rayon lumineux de l'axe principal*. Dès lors, le prolongement géométrique I'F_2 du rayon émergent vient rencontrer l'axe principal en un certain point F_2, situé *du même côté de la lentille que le rayon incident* (*). — Nous admettrons comme fait d'expérience que, dans une lentille à bords épais, de faible diamètre d'ouverture, le point F_2 est *le même pour tous les rayons incidents parallèles à l'axe principal*.

Réciproquement, en vertu de la loi du retour inverse, si l'on considère un point lumineux *virtuel* qui serait placé en F_2, tout rayon S'I' dirigé vers ce point se réfracterait suivant une parallèle IS à l'axe principal.

Si la lentille est supposée mince, on peut la représenter par un simple trait L (*fig.* 91) représentant son diamètre d'ouverture, et en indiquant, comme on l'a fait dans cette figure, que les bords sont plus épais que le centre. On peut alors considérer les deux réfractions comme se réduisant à une seule.

En retournant la lentille face pour face, on aurait un second plan focal et un second foyer principal virtuel F_1 (*fig.* 91), symétrique du premier par rapport à la lentille supposée mince. — Dès lors, si dans la figure 91, la lumière vient, par exemple, du côté gauche, le foyer F_2 est le *foyer-image*, le foyer F_1 est le *foyer-objet*. — Tout rayon parallèle à l'axe principal, tel que RI, se réfracte suivant une direction IT, qui passe virtuellement par le foyer F_2. Tout rayon tel que MJ, dirigé vers le foyer F_1 jouant le rôle de point lumineux virtuel, se réfracte suivant une parallèle JN à l'axe principal.

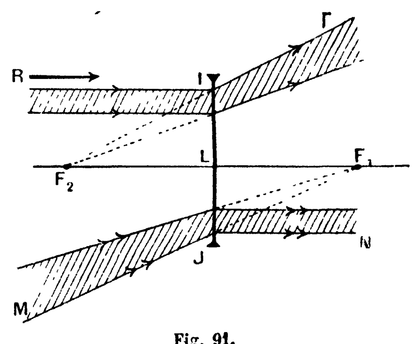


Fig. 91.

C'est cette propriété de faire diverger un faisceau de rayons

(*) La lentille agit sur le rayon SI comme le ferait un prisme de verre dont les faces se confondraient avec les plans tangents menés en I et I', et dont la base serait par conséquent du côté opposé à l'axe principal.

parallèles, commune aux trois espèces de lentilles minces à bords épais B, B', B'' (*fig.* 73), qui leur a fait donner le nom de lentilles *divergentes*.

80. ***Images produites par les lentilles divergentes. — Plans conjugués.*** — Lorsqu'on place un objet lumineux, la flamme d'une bougie par exemple, devant une lentille divergente, on ne trouve nulle part, derrière la lentille, de position d'écran où se produise une image réelle. Mais, si l'on place l'œil derrière la lentille, on aperçoit une image virtuelle, qui paraît plus rapprochée de la lentille que l'objet, de même sens que lui et plus petite.

Dès lors, si l'on admet, d'après cette expérience, l'existence de *plans conjugués* dans les lentilles divergentes comme dans les lentilles convergentes, il est facile de construire une image, connaissant la position des foyers principaux. Soit AB (*fig.* 92) un objet réel. Le rayon AI parallèle à l'axe principal se réfracte de façon que son prolongement, tracé en pointillé, passe par le foyer image F_2. Le rayon AJ, dirigé vers le foyer-objet F_1 se réfracte suivant une parallèle menée par le point J à l'axe principal; le prolongement de ce rayon coupe le prolongement du précédent en un point A' et l'image cherchée est A'B'. La marche d'un pinceau lumineux, tracée en hachures sur la figure 92, achève de rendre compte du rôle de la lentille.

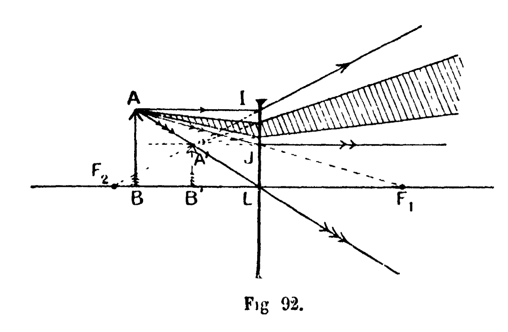


Fig 92.

81. ***Centre optique. — Axes secondaires. — Construction des images.*** — Comme dans les lentilles convergentes (76), il existe un *centre optique*, qui se trouve encore au point L où l'axe principal rencontre la lentille (*); tout rayon qui passe par ce point est un rayon sans déviation, ou *axe secondaire*. On peut donc se servir, pour la construction d'une image, de deux quelconques des trois rayons AI, AL et AJ.

Considérons, par exemple, le cas d'un objet *virtuel* B' (*fig.* 93), placé entre la lentille divergente L et le foyer objet F_1. On peut obtenir cet objet virtuel en formant, au moyen d'une lentille auxiliaire

(*) La démonstration qui sera donnée plus loin (90) de l'existence du centre optique est générale, et s'applique à toute espèce de lentilles minces.

convergente L′, une image réelle B′ de la flamme d'une bougie B, puis en intercalant la lentille divergente L entre L′ et B′, de façon que B′ soit situé entre L et F_1. On obtiendra l'image définitive du sommet de la flamme en traçant d'abord le rayon parallèle à l'axe principal, qui passerait par l'extrémité de la flamme B′; ce rayon se réfracte de façon que son prolongement passe par le foyer-image F_2; puis l'axe secondaire du sommet de la flamme B′,

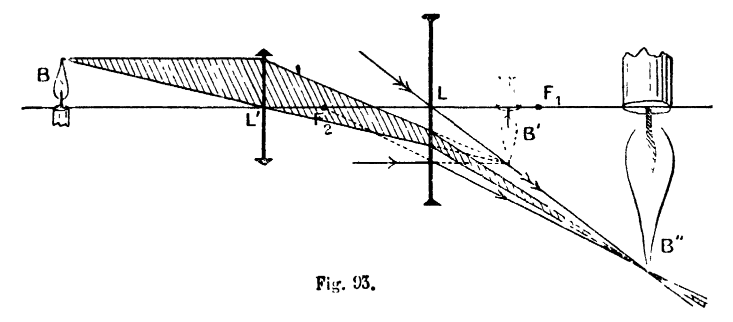


Fig. 93.

par rapport à la lentille L. Ces deux rayons se rencontrent réellement, en donnant l'image B″. Cette image est de même sens que l'objet virtuel, plus grande que lui, et plus éloignée de la lentille, comme on peut le vérifier par l'expérience.

Si l'on envisage le cas d'un objet virtuel situé au delà du foyer-objet F_1, on obtient par la construction géométrique une image définitive, virtuelle, renversée, plus grande ou plus petite que l'objet virtuel, suivant que cet objet se trouve à une distance comprise entre f et $2f$ ou supérieure à $2f$. Nous aurons à revenir sur ce point à propos de la lunette de Galilée.

Remarque. — Il est à remarquer, d'après les résultats de toutes ces constructions, qu'une lentille divergente rend toujours plus divergent un faisceau qui l'est déjà (1°), et que, si elle ne fait pas toujours diverger un faisceau convergent (2°), elle le rend toutefois moins convergent. — Une telle lentille mérite donc bien l'épithète de *divergente*, qui lui a été donnée d'après son action sur un faisceau de rayons parallèles.

V. — Lentilles sphériques minces : étude théorique. Formules des lentilles sphériques.

82. ***Étude théorique des lentilles sphériques.*** — Comme dans le cas des miroirs sphériques, on peut, au lieu de faire appel à l'ex-

périence, se proposer de traiter *à priori* le problème des lentilles, en s'appuyant sur les lois de la réfraction et sur les théorèmes de la géométrie.

Sous sa forme la plus générale, le problème à résoudre est le suivant, analogue à celui des miroirs sphériques :

Un objet donné envoie des faisceaux lumineux sur une lentille sphérique mince :

1° *A quelles conditions cet objet admet-il une image?*

2° *Déterminer la position et la grandeur de cette image.*

Mais quand un rayon lumineux traverse une lentille, il subit *deux réfractions* à travers des surfaces sphériques; nous allons donc étudier d'abord la réfraction d'*un seul faisceau conique à travers une surface sphérique séparant deux milieux réfringents.*

Nous supposerons tout de suite, pour simplifier, que *l'ouverture de la portion de sphère utilisée est très faible*, et que le point lumineux, sommet du faisceau conique incident, est compris à l'intérieur du cône d'ouverture, c'est-à-dire que *le faisceau incident est un faisceau de rayons centraux.*

Une surface sphérique réfringente utilisée dans ces conditions s'appelle un *dioptre sphérique.*

83. *Réfraction d'un faisceau de rayons centraux à travers un dioptre sphérique.* — Soit C (*fig* 94) le centre d'un dioptre sphérique de faible ouverture séparant deux milieux d'*indices absolus* (47)

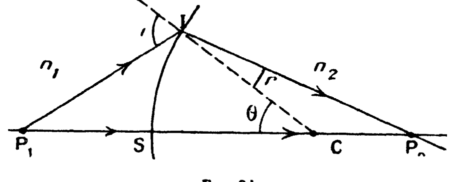


Fig 94.

n_1 et n_2 Un point lumineux P_1, placé dans le premier milieu, envoie sur le dioptre un faisceau de rayons; parmi ces rayons, l'un est dirigé suivant P_1C, axe secondaire de P_1, et rencontre le dioptre normalement en S, où il se réfracte sans subir de déviation. Prenons un autre rayon incident P_1I; il rencontre le dioptre en I, faisant avec la normale un angle d'incidence i; il se réfracte en IP_2 en faisant un angle de réfraction r avec CI.

La loi de Descartes nous donne

$$(1) \qquad n_1 \sin i = n_2 \sin r.$$

Le rayon réfracté IP_2 vient couper l'axe P_1C en P_2 : si P_1 admet

une image, ce sera le point P_2, car l'image est le point de concours de tous les rayons réfractés. Déterminons la position de P_2. Soit θ l'ouverture du dioptre correspondant au point I d'incidence de P_1I; les triangles P_1IC et P_2IC donnent :

$$\frac{P_1I}{\sin\theta}=\frac{P_1C}{\sin i} \quad \text{et} \quad \frac{P_2I}{\sin\theta}=\frac{P_2C}{\sin r};$$

en divisant membre à membre et tenant compte de (1), il vient :

$$(2) \qquad n_1\frac{P_2I}{P_1I}=n_2\frac{P_2C}{P_1C};$$

mais dans les triangles envisagés, on a :

$$\overline{P_2I}^2=\overline{P_2C}^2+\overline{CI}^2+2P_2C.CI\cos\theta$$

et
$$\overline{P_1I}^2=\overline{P_1C}^2+\overline{CI}^2-2P_1C.CI\cos\theta;$$

portant ces valeurs dans (2), après avoir élevé au carré, il vient :

$$(3) \qquad n_1^2\frac{\overline{P_2C}^2+\overline{CI}^2+2P_2C.CI\cos\theta}{\overline{P_1C}^2+\overline{CI}^2-2P_1C.CI\cos\theta}=n_2^2\frac{\overline{P_2C}^2}{\overline{P_1C}^2}.$$

Cette équation montre que P_2C, c'est-à-dire la position du point P_2, dépend de l'angle θ, et par suite du rayon incident choisi : à chaque rayon incident correspondra un point P_2 différent; donc, *dans le cas général*, les rayons réfractés ne passent pas par le même point P_2; *le point* P_1 *n'admet pas d'image* (*).

Mais nous avons supposé que le faisceau incident est un faisceau de rayons centraux, ce qui entraîne la condition que θ reste compris entre d'étroites limites au voisinage de 0°; par suite, $\cos\theta$ pourra sans erreur sensible être pris égal à l'unité (**); l'équation (3), où l'on fera $\cos\theta=1$, deviendra après extraction de la racine carrée,

$$n_1\frac{P_2C+CS}{P_1C-CS}=n_2\frac{P_2C}{P_1C},$$

(*) Toutefois on pourrait chercher la condition à laquelle l'équation (3) doit satisfaire pour que P_2C, c'est-à-dire la position du point P_2, fût indépendante de l'angle θ; il suffirait, après avoir réduit au même dénominateur, d'écrire que le coefficient de $\cos\theta$, dans l'équation obtenue, est égal à 0; le calcul ne présente aucune difficulté et conduit au résultat suivant : en combinant la condition obtenue avec l'équation (3), on trouve que la sphère réfringente est *rigoureusement stigmatique* pour son centre C, qui est à lui-même sa propre image (évident *à priori*), et pour un point situé à une distance du centre égale à $\frac{n_2}{n_1}R$; l'image est alors à la distance $\frac{n_1}{n_2}R$ de C.

(**) Voici les valeurs de $\cos\theta$ pour des valeurs de θ très voisines de 0° (voir la 2e note de la page 40).

Valeur de θ.	Valeurs de $\cos\theta$.
0°	1,0000
± 1°	0,9998
± 2°	0,9994
± 3°	0,9986

puisque $CS = CI$; si l'on remplace P_1C par $P_1S + CS$ et de même P_2C par $P_2S - CS$, il vient tous calculs faits :

$$(4) \qquad \frac{n_1}{P_1S} + \frac{n_2}{P_2S} = \frac{n_2 - n_1}{CS}$$

Cette équation nous montre que, sous les conditions énoncées plus haut, P_2S, dont la valeur fixe la position du point P_2, est indépendant du rayon incident choisi; donc, tous les rayons réfractés viennent passer par le même point P_2 de l'axe P_1C qui est alors l'image de P_1.

Donc, *le dioptre sphérique est stigmatique pour un faisceau de rayons centraux*; il transforme, par réfraction, un faisceau *conique* de rayons centraux en un autre faisceau *conique* : la réfraction par un dioptre, sous les conditions énoncées, ne change pas la nature du faisceau.

84. ***Généralisation de la formule du dioptre sphérique.*** — La formule (4) où les symboles P_1S, P_2S, CS représentent des distances ne s'applique qu'au cas particulier de figure pour lequel elle a été établie; mais les points P_1, P_2, C, S peuvent occuper sur l'axe CS des positions relatives différentes de celles que représente la figure 94; de plus, on a supposé implicitement, pour tracer le rayon réfracté IP_2, que le second milieu est plus réfringent que le premier, l'angle r est plus petit que i. Si l'on traite un autre cas, en supposant, par exemple, que le dioptre tourne sa concavité vers la lumière incidente (*fig* 95), et même $n_2 < n_1$, les points considérés sont alors placés comme on le voit sur la figure, et un calcul, semblable au précédent, conduit à la formule :

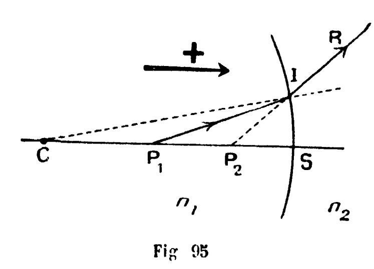


Fig 95

$$(4)' \qquad \frac{n_1}{P_1S} - \frac{n_2}{P_2S} = -\frac{n_2 - n_1}{CS}.$$

Quel que soit le cas particulier traité, on arrive toujours à une formule qui contient les termes $\frac{n_1}{P_1S}$, $\frac{n_2}{P_2S}$ et $\frac{n_2 - n_1}{CS}$, mais avec des signes différents dans chaque cas. Or, on sait que si un problème de géométrie conduit à une formule telle que la précédente, et que les solutions qui conviennent aux divers cas particuliers ne diffèrent que par les signes, on peut représenter tous les cas possibles par

une seule formule, à condition d'envisager les longueurs qui entrent dans la formule comme des segments susceptibles de signes.

En particulier, pour le problème qui nous occupe, nous ferons la convention suivante :

Convention de signes. — *Les longueurs qui entrent dans l'équation du dioptre sont envisagées comme des segments comptés à partir de S, sommet du dioptre, comme origine,* **positivement** *dans le sens de propagation de la* **lumière réfractée,** *et négativement en sens inverse.*

Alors l'équation générale du dioptre devient :

(5) $$-\frac{n_1}{p_1}+\frac{n_2}{p_2}=\frac{n_2-n_1}{R},$$

en posant pour simplifier l'écriture

$$\overline{SP_1}=p_1, \qquad \overline{SP_2}=p_2 \quad \text{et} \quad \overline{SC}=R.$$

On peut vérifier que la formule (4)′ où les longueurs P_1S, P_2S, CS sont des nombres *positifs* de centimètres, est bien donnée par la formule (5) dans laquelle on remplace les segments p_1, p_2 et R par leurs valeurs affectées de leurs signes ; en effet, supposons que ces distances de la figure 95 soient respectivement $P_1S = 30$ cm, $P_2S = 25$ cm et $CS = 40$ cm ; l'équation (4)′ devient

$$\frac{n_1}{30} \quad \frac{n_2}{25} = \frac{n_2-n_1}{40}$$

Appliquons maintenant l'équation (5), avec la convention de signes, à la figure 95 ; on a

$$p_1=\overline{SP_1}=-30 \text{ cm},$$
$$p_2=\overline{SP_2}=-25 \text{ cm},$$
$$R=\overline{SC}=-40 \text{ cm};$$

si on remplace dans (5), on trouve

$$-\frac{n_1}{-30}+\frac{n_2}{-25}=\frac{n_2-n_1}{-40},$$

qui est bien identique à l'équation qu'on a déduite de (4)′.

85. ***Foyers principaux.*** — Les points P_1 et P_2 définis en position par les segments p_1 et p_2 sont des *points conjugués* ; si le point P_1 est à l'infini, son conjugué occupe une position particulière F_2, que l'on peut déduire de l'équation (5) en y faisant $p=\infty$; on en tire alors

$$p_2=\overline{SF_2}=\frac{n_2}{n_2-n_1}R=f_2;$$

ce point F_2, défini par $f_2 = \overline{SF_2}$, s'appelle le *foyer principal image* du dioptre.

De même la position particulière F_1 de P_1 telle que son conjugué soit à l'infini ($p_2 = \infty$), est donnée par

$$p_1 = \overline{SF_1} = -\frac{n_1}{n_2 - n_1} R = f_1;$$

ce point F_1, défini par $f_1 = \overline{SF_1}$ s'appelle le *foyer principal objet* du dioptre.

On peut donner une autre forme à l'équation (5), en y introduisant les valeurs de f_1 et de f_2 : multiplions en effet l'équation (5) par $\frac{R}{n_2 - n_1}$, nous arrivons, toutes réductions faites, à une forme remarquable de l'équation des dioptres.

$$(6) \qquad \frac{f_1}{p_1} + \frac{f_2}{p_2} = 1.$$

Les distances focales f_1 et f_2 satisfont encore à des relations remarquables faciles à obtenir. En premier lieu,

$$(7) \qquad \frac{f_1}{f_2} = -\frac{n_1}{n_2};$$

le rapport des distances focales principales est égal au rapport des indices, changé de signe; comme les indices n_1 et n_2 sont toujours positifs, il s'ensuit que les deux segments

$$f_1 = \overline{SF_1} \qquad \text{et} \qquad f_2 = \overline{SF_2},$$

sont toujours de signes contraires; *les deux foyers principaux sont toujours situés de part et d'autre du point* S. Le foyer F_1 est un foyer de lumière incidente; il sera *réel* quand on aura $f_1 < 0$, c'est-à-dire quand il sera effectivement *dans le premier milieu*; il sera *virtuel* quand il se trouvera dans le *second milieu*; de même, F_2 est un foyer de lumière réfractée qui sera *réel* s'il se trouve *dans le second milieu*, $f_2 > 0$, et *virtuel dans le cas contraire.*

Les deux foyers principaux sont toujours réels ou virtuels ensemble; s'ils sont *réels*, le dioptre est dit *convergent* (*), s'ils sont *virtuels*, il est *divergent*.

Additionnons à présent les deux distances focales, il vient

$$(7) \qquad f_1 + f_2 = \left(\frac{n_1}{n_2 - n_1} + \frac{n_2}{n_2 - n_1} \right) R = R;$$

(*) C'est le cas de l'œil (98).

Si donc on part du point S, que l'on porte successivement et à la suite, sur l'axe, deux segments équipollents à f_1 et f_2, on retombe au point C,

$$\overline{SF_1} + \overline{F_1C} = \overline{SC},$$

donc $$\overline{F_1C} = f_2 = \overline{SF_2} \text{ (*)}$$

86. ***Cas d'un objet lumineux. — Plans conjugués.*** — Si la condition de stigmatisme (83) est satisfaite pour tous les points d'un objet lumineux, il admettra une image par réfraction dans un dioptre sphérique; mais, comme dans le cas des miroirs (40), l'image n'est pas, en général, *semblable* à l'objet, ni, par suite, *utilisable*; il se pose alors dans le cas du dioptre sphérique le même problème que dans le cas des miroirs sphériques (40), et l'on peut, par un raisonnement *identique* à celui qui a été employé plus haut (40), démontrer le théorème suivant :

Théorème. — *Si un petit objet plan, placé dans un milieu d'indice n_1 séparé d'un second milieu d'indice n_2 par un dioptre sphérique, a ses différents points très voisins du pied* B_1 *de la perpendiculaire menée du centre* C *du dioptre sur le plan de l'objet (axe secondaire de l'objet), et que la condition de stigmatisme* (83) *soit satisfaite pour tous ses points, cet objet admet, dans le second milieu, une image plane, homothétique de l'objet par rapport au centre du dioptre; les distances $p_1 = \overline{SB_1}$ et $p_2 = \overline{SB_2}$ du point* S, *où l'axe rencontre le dioptre, à l'objet et à son image sont liées par la relation.*(5) *déjà obtenue* (84),

$$-\frac{n_1}{p_1} + \frac{n_2}{p_2} = \frac{n_2 - n_1}{R}.$$

Nous ne reviendrons pas sur la démonstration de ce théorème qui a été faite plus haut (40).

Resterait à calculer la valeur du rapport d'homothetie ou *grandissement* γ; on peut établir facilement qu'il a pour valeur

$$\gamma = \frac{\textit{image}}{\textit{objet}} = \frac{n_1 p_2}{n_2 p_1}.$$

Soit en effet A_1B_1 un objet plan situé devant le dioptre de sommet S et de centre C (*fig.* 96), construisons l'image de A_1B_1 : soient F_1 et F_2 le foyer objet et le foyer image, parmi les rayons partis de A_1, choisissons-en deux : celui dont la direction passe par C, qui traverse le dioptre sans déviation,

(*) Il est bon, quand on trace une figure de dioptre, de tenir compte de cette relation remarquable pour situer les foyers principaux, si l'on ne veut pas être conduit à une représentation graphique absurde.

et celui qui, se propageant parallèlement à l'axe CS de l'objet A_1B_1, se refracte en passant par le foyer image F_2. Ces deux rayons réfractés déter-

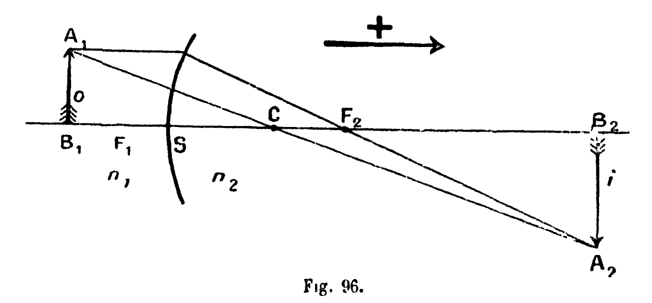


Fig. 96.

minent le point A_2, image de A_1; en menant A_2B_2 perpendiculaire à CS, on a l'image de A_1B_1.

Envisageons les deux triangles A_1B_1C et A_2B_2C, qui sont *homothétiques* par rapport au point C, ils donnent, *en grandeur et en signe* :

$$\gamma = \frac{i}{o} = \frac{\overline{CB_2}}{\overline{CB_1}} = \frac{\overline{CS} + \overline{SB_2}}{\overline{CS} + \overline{SB_1}} = \frac{-R + p_2}{-R + p_1},$$

De plus, l'équation (5) du paragraphe 84, réduite au même dénominateur, donne

$$n_2p_1(p_2 - R) = n_1p_2(p_1 - R)$$

d'où

$$\frac{p_2 - R}{p_1 - R} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{p_2}{p_1}.$$

Portant cette valeur dans l'équation qui donne γ, on trouve

$$\gamma = \frac{i}{o} = \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{p_2}{p_1},$$

qui est bien la formule à établir. Nous avons trouvé plus haut

$$\frac{n_1}{n_2} = -\frac{f_1}{f_2},$$

d'où encore la forme suivante pour le grandissement

$$\gamma = \frac{i}{o} = -\frac{f_1}{f_2} \cdot \frac{p_2}{p_1}.$$

87. ***Lentilles sphériques minces. — Formule des points conjugués.*** — On appelle lentille l'assemblage de deux dioptres sphériques S_1 et S_2 (*fig.* 97) séparant trois milieux; nous supposerons que le 1er milieu et le 3e sont identiques. Soient C_1 le centre du premier dioptre, C_2 celui du second; la droite C_1C_2 s'appelle l'axe principal de la lentille. Si les deux dioptres ont une faible ouverture, et qu'ils ne reçoivent que des faisceaux de rayons centraux, la

condition de stigmatisme sera satisfaite pour tout point P_1 de l'axe principal ; il admettra une image P′ dans S_1, et P′ donnera de même

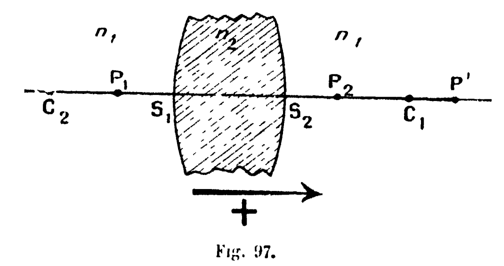


Fig. 97.

une image P_2 dans S_2. Les points P_1 et P_2 sont conjugués par rapport à la lentille S_1S_2.

Cherchons la relation qui lie les positions de P_1 et de P_2.

Prenons toujours pour sens positif le sens de la lumière réfractée, et posons $\overline{S_1C_1}=R_1$, $\overline{S_2C_2}=R_2$, $\overline{S_1P_1}=p_1$, $\overline{S_1P'}=p'$, $\overline{S_2P'}=p''$, $\overline{S_2P_2}=p_2$ et $\overline{S_1S_2}=e$; l'équation fondamentale du dioptre, appliquée à S_1 et à S_2 donne :

$$-\frac{n_1}{p_1}+\frac{n_2}{p'}=\frac{n_2-n_1}{R_1}$$

$$-\frac{n_2}{p''}+\frac{n_1}{p_2}=\frac{n_1-n_2}{R_2},$$

en appelant n_2 l'indice absolu de la lentille, et n_1 celui du milieu extérieur; de plus le théorème des segments donne

$$\overline{S_1P'}+\overline{P'S_2}=\overline{S_1S_2}$$

ou

$$p'-p''=e.$$

Supposons négligeable l'épaisseur de la lentille, alors $e=0$, et ces trois équations permettent facilement l'élimination de p' et de p'' (il suffit d'ajouter les deux premières, puisque $p'-p''=0$); il vient

$$-\frac{n_1}{p_1}+\frac{n_1}{p_2}=(n_2-n_1)\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right),$$

ou en divisant tout par n_1 et posant $\frac{n_2}{n_1}=n$, *indice relatif du milieu de la lentille par rapport au milieu extérieur.*

$$(1)\qquad -\frac{1}{p_1}+\frac{1}{p_2}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)$$

Dans cette formule, l'épaisseur de la lentille est supposée nulle; les deux points S_1 et S_2 sont confondus en un point S, et les segments sont alors

$$p_1 = \overline{SP}_1, \quad p_2 = \overline{SP}_2, \quad R_1 = \overline{SC}_1 \quad \text{et} \quad R_2 = \overline{SC}_2.$$

Cette formule est générale comme celle du dioptre.

88. ***Foyers principaux.*** — Si dans la formule précédente (1), on fait $p_1 = \infty$, on trouve pour image du point P_1 un point F_2 défini par

$$p_2 = \overline{SF}_2 = \frac{1}{(n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)} = f_2.$$

C'est le *foyer principal image*, *foyer* de lumière *réfractée* par la lentille; de même le point F_1 dont le conjugué est à l'infini ($p_2 = \infty$) et qui est donné par

$$p_1 = \overline{SF}_1 = -\frac{1}{(n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)} = f_1,$$

est le *foyer principal objet*; c'est un *foyer* de lumière *incidente.*

Ces deux foyers sont équidistants du sommet S de la lentille

$$f_1 + f_2 = 0;$$

les deux distances focales sont donc *toujours égales et de signes contraires.*

$\overline{SF}_2 > 0$, le foyer image est réel; alors $\overline{SF}_1 < 0$, le foyer objet, est aussi réel.

$\overline{SF}_2 < 0$, le foyer image est virtuel; $\overline{SF}_1 > 0$, le foyer objet, est aussi virtuel.

Dans le premier cas (*foyers principaux réels*), la lentille est dite *convergente* (*fig.* 76); dans l'autre cas (*foyers principaux virtuels*), elle est *divergente* (*fig.* 91).

Quand on parle du *foyer d'une lentille*, c'est toujours du *foyer image* qu'il s'agit et la distance focale que nous avons représentée plus haut par la lettre f, est la distance focale image, c'est-à-dire le segment $f_2 = \overline{SF}_2$.

On peut sans peine reconnaître les formes des lentilles convergentes ou divergentes. Si la lentille est plus réfringente que le milieu extérieur, $n > 1$, et le signe de f_2 dépendra uniquement de celui du binôme $\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}$. Voici les résultats de la discussion.

Lentilles convergentes (fig. 72).	Lentilles divergentes (fig. 73).
$R_1 > 0$, $R_2 < 0$: Lentille biconvexe.	$R_1 < 0$, $R_2 > 0$: Lentille biconcave.
$R_1 > 0$, $R_2 = \infty$: Lentille plan convexe.	$R_1 < 0$, $R_2 = \infty$: Lentille plan concave.
$R_1 > 0$, $R_2 > 0$, $R_2 > R_1$: Ménisque convergent	$R_1 < 0$, $R_2 < 0$, $\lvert R_1 \rvert < \lvert R_2 \rvert$: Ménisque divergent.

Rappelons que, dans ce tableau, R_1 et R_2 sont des segments définis par $\overline{S_1C_1} = R_1$ et $\overline{S_2C_2} = R_2$, et que symbole $\lvert R_1 \rvert$ signifie *valeur absolue du segment* R_1.

89. ***Cas d'un objet. — Plans conjugués.*** — Soit un petit objet plan A_1B_1 (*fig.* 98) placé devant une lentille S_1S_2; supposons que les conditions énoncées dans le théorème établi plus haut (86) soient

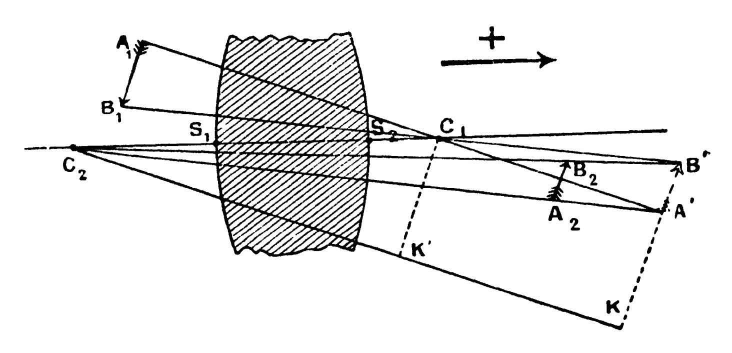


Fig. 98.

satisfaites par rapport au premier dioptre S_1; ce dioptre donnera de A_1B_1 une image A'B' homothétique de A_1B_1 par rapport au point C_1, centre de S_1.

Pour que le second dioptre S_2 donne de A'B' une image A_2B_2 homothétique de A'B' par rapport au centre C_2, il faut que A'B' ait ses différents points infiniment voisins du pied K de la perpendiculaire menée de C_2 sur le plan de A'B'; mais ces différents points sont déjà infiniment voisins du point A', situé sur la perpendiculaire A_1C_1A' menée de C_1 sur A_1B_1, donc les deux points A' et K doivent être très voisins. Menons C_1K' perpendiculaire à C_2K ; on a évidemment $A'K = C_1K'$; mais dans le triangle rectangle C_2C_1K',

$$C_1K' = C_1C_2 \sin C_1C_2K' ;$$

C_1K' et par suite A'K ne pourra être infiniment petit que si l'un des deux facteurs C_1C_2 ou sin C_1C_2K' est lui-même infiniment petit. Or C_1C_2 ne peut pas être très petit, car la lentille aurait une épaisseur égale à la somme ou à la différence des rayons R_1 et R_2, et elle ne serait plus infiniment mince, comme nous l'avons supposé, donc *c'est l'angle C_1C_2K' qui doit être très petit*. On sera dans les meilleures conditions possibles si cet angle est égal à zéro; alors les deux droites C_1A_1 (axe de A_1B_1 par rapport au dioptre S_1) et C_2K (axe de A_2B_2 par rapport au dioptre S_2) sont confondues avec l'axe principal de la lentille. Nous pouvons donc énoncer le théorème suivant.

Théorème. — *Si un petit objet plan, perpendiculaire à l'axe principal d'une lentille mince, a ses différents points très voisins de cet axe, et que la condition de stigmatisme soit satisfaite pour tous les points de l'objet, la lentille en donne une image plane, parallèle à l'objet, et homothétique de l'objet; les distances $\overline{SB_1}=p_1$ et $\overline{SB_2}=p_2$ du sommet S de la lentille à l'objet et à l'image sont liées par la relation*

$$(1) \qquad -\frac{1}{p_1}+\frac{1}{p_2}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)=\frac{1}{f_2},$$

où R_1, R_2 et f_2 désignent respectivement les segments $\overline{SC_1}$, $\overline{SC_2}$, $\overline{SF_2}$, F_2, étant le foyer principal image de la lentille.

Les deux plans qui contiennent l'image et l'objet s'appellent des *plans conjugués*.

90. ***Détermination du centre et du rapport d'homothétie de l'image et de l'objet.*** — Soit A_1B_1 (*fig* 99) un objet perpendiculaire

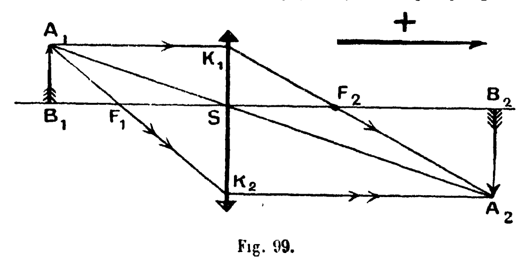


Fig. 99.

à l'axe principal d'une lentille mince quelconque, convergente par exemple, de sommet S et dont les foyers principaux sont F_1 (foyer objet) et F_2 (foyer image). Construisons l'image A_2B_2.

Le rayon A_1K_1, parallèle à l'axe principal se réfracte en passant par F_2; le rayon A_1F_1 se réfracte en K_2, comme s'il venait de F_1,

parallèlement à l'axe principal, et vient couper le premier en A_2, qui sera l'image de A_1 ; en menant A_2B_2 perpendiculaire à l'axe principal, nous aurons l'image A_2B_2 de A_1B_1. Joignons A_1A_2 ; comme l'image est homothétique de l'objet, A_1A_2 coupe B_1B_2 en un point O non figuré qui sera le centre d'homothétie de l'image et de l'objet. Il est facile de montrer que le point O *coïncide* avec le point S ; en effet, envisageons les deux triangles $A_1K_2A_2$ et $K_1K_2A_2$; ils ont leur base K_2A_2 commune et même hauteur K_1K_2 ; donc les côtés de ces triangles interceptent sur B_1B_2, parallèle à la base, des segments OF_1 (O intersection de A_1A_2 et de B_1B_2) et SF_2 qui sont égaux ; mais $SF_1 = SF_2$ en grandeur, donc $OF_1 = SF_1$, donc S et O coïncident. S *est le centre d'homothétie de l'image et de l'objet.* Alors la valeur du rapport d'homothétie ou *grandissement* est

(2) $$\gamma = \frac{i}{o} = \frac{\overline{SB_2}}{\overline{SB_1}} = \frac{p_2}{p_1}.$$

Le point S *s'appelle le centre optique de la lentille*(*).

Les formules (1) et (2) sont tout à fait générales, comme l'équation des dioptres d'où l'on est parti ; leur discussion algébrique conduirait aux mêmes résultats que ceux que nous avons trouvés dans l'étude expérimentale des lentilles minces.

On peut établir directement, dans le cas d'une lentille mince placée dans l'air, l'existence d'un centre optique, qui est centre d'homothétie de l'image et de l'objet, et qui coïncide avec le sommet S de la lentille.

Soit une lentille quelconque S_1S_2 (*fig.* 100) ; nous allons d'abord démontrer le théorème suivant : *Il existe, sur l'axe principal, un point fixe* O, *tel que tout rayon qui, dans l'intérieur de la lentille, passe par le point* O, *émerge parallèlement à sa direction d'incidence.*

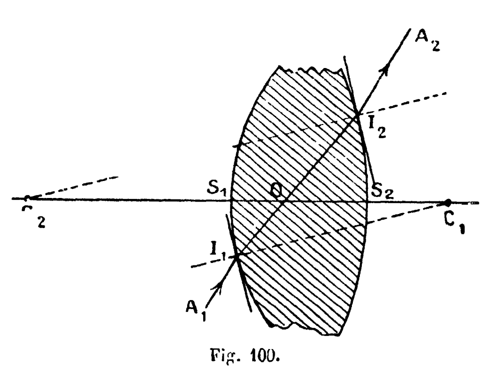


Fig. 100.

Menons, en effet, deux plans tangents parallèles aux deux faces de la lentille, soient I_1 et I_2 les points de contact ; il est évident que le plan $I_2I_1C_1$

(*) La formule (2) est une conséquence immédiate de l'expression donnée plus haut pour la valeur du grandissement dans le cas d'un seul dioptre (86), il suffit pour l'établir

qui contient la droite C_1I_1, contient aussi la droite C_2I_2 qui est parallèle à C_1I_1 ; par suite la droite I_1I_2 coupe C_1C_2 en un point O. Considérons I_1I_2 comme un rayon lumineux ; il provient alors d'un certain rayon incident A_1I_1, que l'on pourrait construire géométriquement par un procédé déjà indiqué (49), car on connaît l'angle de réfraction $C_1I_1I_2$ et l'indice n du verre de la lentille ; en I_2, le rayon I_1I_2 se réfractera, et donnera un rayon I_2A_2 parallèle à A_1I_1, puisque tout se passe comme si la réfraction se faisait à travers une lame à faces parallèles constituée par les plans tangents en I_1 et I_2. Dans les triangles C_1OI_1 et C_2OI_2 *homothétiques*, on a :

$$\frac{\overline{OC_1}}{\overline{OC_2}}=\frac{\overline{I_1C_1}}{\overline{I_2C_2}}=\frac{\overline{S_1C_1}}{\overline{S_2C_2}}=\frac{R_1}{R_2},$$

ou en appliquant le théorème des segments :

$$(1)\qquad \frac{\overline{OC_1}-\overline{S_1C_1}}{\overline{OC_2}-\overline{S_2C_2}}=\frac{\overline{OS_1}}{\overline{OS_2}}=\frac{R_1}{R_2}.$$

Le point O partage donc le segment C_1C_2 et aussi le segment S_1S_2 en deux parties qui sont dans un rapport fixe, égal au rapport des rayons de courbure des deux faces de la lentille ; donc *le point* O *est un point fixe*, ce qui établit le théorème proposé.

Cherchons ce que devient le point O quand le segment S_1S_2 tend vers zéro, cas où la lentille devient infiniment mince ; les deux derniers rapports de l'équation (1) ci-dessus peuvent s'écrire :

$$\frac{\overline{OS_1}}{\overline{OS_2}-\overline{OS_1}}=\frac{R_1}{R_2-R_1},$$

ou d'après le théorème des segments :

$$\frac{\overline{OS_1}}{\overline{S_1S_2}}=\frac{R_1}{R_2-R_1},$$

d'où :

$$\overline{OS_1}=\overline{S_1S_2}\cdot\frac{R_1}{R_2-R_1};$$

par suite OS_1 tend vers zéro avec S_1S_2 ; donc *quand la lentille est infiniment mince, le point* O *se confond avec le point* S, *sommet de la lentille, où sont alors confondus* S_1 *et* S_2.

Mais alors le trajet I_1I_2 (*fig.* 100) est devenu infiniment petit, et le rayon $A_1I_1I_2A_2$ traverse la lentille sans déviation ; *le point* S *est donc le centre optique, ou centre d'homothétie de l'image et de l'objet.*

d'appliquer cette expression successivement aux deux dioptres qui constituent la lentille.

91. *Applications*. — Nous allons appliquer les formules des lentilles à la résolution de deux problèmes particuliers.

1° *On veut avoir d'un objet une image virtuelle, renversée et double de l'objet ; quelle lentille faut-il prendre, et où faut-il placer l'objet ?*

Puisque l'image est renversée, le rapport γ est alors égal à -2 ; donc les deux équations

$$-\frac{1}{p_1}+\frac{1}{p_2}=\frac{1}{f_2}$$

$$\gamma=\frac{p_2}{p_1}=-2$$

sont les équations du problème. f_2 étant la distance *focale image* de la lentille.

De la seconde, on tire :

$$p_1=-\frac{p_2}{2}$$

et cette valeur, portée dans la première, nous donne :

$$-\frac{2}{-p_2}+\frac{1}{p_2}=\frac{1}{f_2}$$

d'où :

$$f_2=\frac{p_2}{3}.$$

Mais l'image est virtuelle, donc $p_2<0$ et par suite $f_2<0$; la lentille a son foyer image virtuel : *c'est donc une lentille divergente ;* d'ailleurs

$$p_1=-\frac{p_2}{2}=-\frac{3f_2}{2};$$

p_1 est positif, l'objet est donc lui-même virtuel et situé à une distance de la lentille égale à $\frac{-3f_2}{2}$.

La figure 101 représente la construction de l'image.

2° *Une lentille convergente* S, *de* 50 *cm de distance focale image, donne une image réelle du Soleil; derrière cette lentille, à une distance* $\overline{SS'}=30$ *cm se trouve une seconde lentille* S', *et à une distance* $\overline{S'E}=2$ *m, on a placé un écran. Quelle doit être la distance focale de la lentille* S' *pour qu'il se forme sur l'écran une image réelle du Soleil? L'image reçue sur l'écran sera-t-elle droite ou renversée par rapport au Soleil? Quel sera le grandissement donné par la seconde lentille, et quel sera le diamètre de l'image reçue sur l'écran?*

La lentille S donne du Soleil une image réelle et renversée située dans son plan focal image, à 50 cm de la lentille; cette image ne se

formera pas et jouera le rôle d'un objet virtuel par rapport à la lentille S'; l'image finale se formant sur l'écran, on a, en appliquant les équations des lentilles à S'

$$-\frac{1}{+20}+\frac{1}{200}=\frac{1}{f'_2},$$

f'_2 étant la distance focale image de S'; on tire de là :

$$f'_2=-22{,}2 \text{ cm}.$$

La lentille S' *doit donc être divergente.* D'autre part, on a :

$$\gamma=\frac{+200}{+20}=+10;$$

l'image sera droite par rapport à l'image donnée par S, et par suite

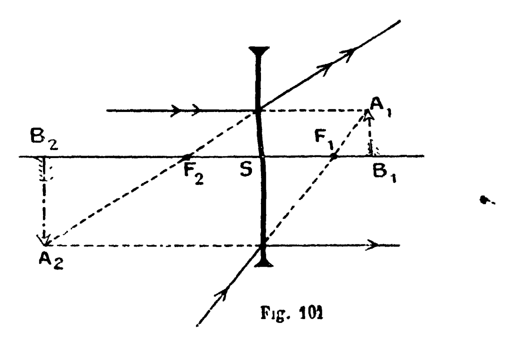


Fig. 101

renversée par rapport au Soleil lui-même; elle sera 10 fois plus grande que l'image intermédiaire. Cette image intermédiaire aurait environ (77) un demi-centimètre de diamètre, et l'image reçue sur l'écran, environ 5 centimètres de diamètre.

92. *Formules de Newton.* — Au lieu de prendre pour origine des segments qui entrent dans les formules des lentilles le sommet S de la lentille, on peut fixer la position de l'image B_2 en donnant le segment $z_2=\overline{F_2B_2}$, et la position de l'objet par le segment $z_1=\overline{F_1B_1}$; ceci revient à prendre deux origines différentes. Posons de plus (*fig.* 102).

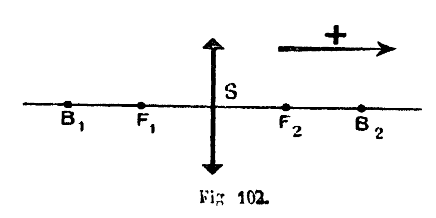


Fig. 102.

$$\overline{F_2S}=\overline{SF_1}=\varphi=-f_2;$$

si l'on garde le même sens positif, le théorème des segments donne, quelles que soient les positions relatives des points S, F_1, F_2, B_1 (objet) et B_2 (image),

$$\overline{SB_1} = \overline{SF_1} + \overline{F_1B_1} \quad \text{ou} \quad p_1 = \varphi + z_1$$
$$\overline{SB_2} = \overline{SF_2} + \overline{F_2B_2} \quad \text{ou} \quad p_2 = -\varphi + z_2;$$

en portant ces valeurs dans les équations des lentilles, et tenant compte de ce que $f_2 = -\varphi$, il vient tous calculs faits :

$$(1)' \qquad z_1 z_2 = -\varphi^2,$$

$$(2)' \qquad \gamma = \frac{i}{o} = -\frac{\varphi}{z_1} = \frac{z_2}{\varphi}$$

Ces formules, tout aussi générales que celles d'où nous sommes partis, sont les formules de Newton, analogues à celles que nous avons obtenues plus haut (42) dans le cas des miroirs.

VI. — Mesure de la distance focale des lentilles sphériques minces.

93 ***Mesure de la distance focale d'une lentille convergente.***

1° *Méthode par l'image du Soleil ou d'un objet très éloigné.* — On obtient immédiatement une valeur approximative de la distance focale principale d'une lentille convergente, en orientant l'axe principal de façon qu'il soit dirigé vers un objet lumineux très éloigné, tel que le Soleil. On cherche alors, à l'aide d'un petit écran, l'endroit où l'image se forme avec le plus de netteté. On a ainsi le plan focal-image, dont il ne reste plus qu'à mesurer la distance à la lentille

2° *Méthode de Silbermann.* — On peut également utiliser la propriété connue des plans conjugués, dans lesquels l'image est égale à l'objet, mais renversée (78, 1°). On sait qu'alors l'objet et l'image sont à la distance $2f$ de la lentille mince; leur distance est donc égale à $4f$. En la mesurant et la divisant par 4, on aura donc f.

Le focomètre de Silbermann, destiné à appliquer cette méthode avec quelque précision, se compose d'une règle divisée (*fig.* 103), au milieu de laquelle est disposée la lentille mince L à étudier. De part et d'autre sont des curseurs mobiles K_1 et K_2, portant des micromètres M_1 et M_2, lames de verre demi-circulaires, sur lesquelles sont gravés des traits fins équidistants : on obtient deux *micromètres* identiques, en coupant au diamant une division gravée sur une lame de verre circulaire, suivant le diamètre perpendiculaire à ces traits. Des repères indiquent les positions des curseurs sur la règle. Une lentille L_1 sert à éclairer, au moyen d'une source S, le micromètre M_1; une

loupe L_2 sert à observer le micromètre M_2 mis au point par l'œil O. On éloigne simultanément les curseurs K_1 et K_2 en les maintenant toujours équidistants de L. Quand on voit les traits de M_1 venir

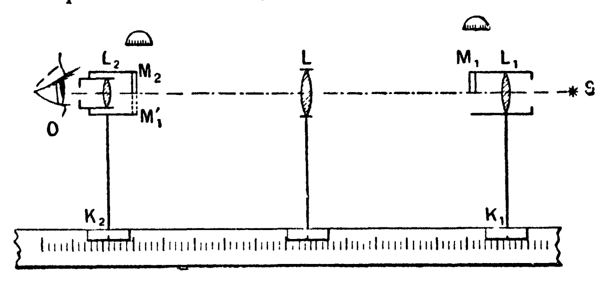


Fig. 103

faire leurs images en M'_1, dans le prolongement des traits de M_2, les micromètres se trouvent dans les plans cherchés. Pour déterminer *d*, c'est-à-dire la distance M_2M_1 à ce moment, on fait les lectures aux curseurs K_1 et K_2, puis on enlève L et on amène M_1 et M_2 en contact; les nouvelles lectures aux curseurs fournissent, avec les premières, la distance cherchée *d*. Le quart de cette distance représente *f*, avec une précision qui ne dépend que de la précision même des mesures de longueur, et abstraction faite de l'erreur provenant de l'épaisseur de la lentille elle-même.

94. ***Mesure de la distance focale d'une lentille divergente.*** — *Méthode de l'objet virtuel.* — Nous avons vu, en étudiant les lentilles divergentes, que, lorsqu'on emploie un objet virtuel situé entre la lentille et le foyer-objet F_1 (*fig.* 93), on obtient une image réelle. Il est facile de déterminer d'abord la position exacte de l'objet virtuel B' au moyen d'un écran, puis de placer la lentille divergente L et de mesurer la distance de l'objet virtuel à la lentille, soit $a = 12$ cm. On cherche ensuite la position à donner à l'écran pour recevoir l'image définitive réelle B'', et l'on mesure également sa distance à la lentille, soit $a' = 20$ cm.

On porte ensuite ces valeurs dans la formule algébrique générale (1) du paragraphe 89, en tenant compte des signes des segments. L'objet étant *virtuel*, $p_1 > 0$ et égal à $+ 12$ cm; l'image étant réelle, $p_2 > 0$ et égal à 20 cm; l'équation devient par cette substitution :

$$-\frac{1}{+12}+\frac{1}{+20}=\frac{1}{f},$$

d'où $$f = -20 \text{ cm};$$

f doit en effet être négatif, la lentille étant divergente.

95. *Convergence.* — *Dioptrie.* — On appelle *convergence* ou *pouvoir convergent* d'une lentille, la quantité $\frac{1}{f}$ inverse de la distance focale f. L'*unité* de convergence adoptée est la *dioptrie*, pouvoir convergent d'une lentille de 1 m de distance focale.

La convergence sera donc évaluée en dioptries quand, dans l'expression $\frac{1}{f}$, la longueur f sera évaluée en *mètres*.

La convergence est considérée comme positive dans les lentilles convergentes, où la convergence au foyer image, d'un rayon parallèle à l'axe, est effective, et comme négative, au contraire, dans les lentilles divergentes. Ainsi, une lentille convergente de 20 cm de distance focale a une convergence de $\frac{1}{0,20} = 5$ dioptries. — Une lentille divergente de 50 cm de distance focale a une convergence de $\frac{1}{-0,50} = -2$ dioptries.

96. *Système de lentilles minces centrées et accolées.* — *Théorème des convergences.* — Prenons deux lentilles convergentes quelconques, ayant pour distances focales, par exemple, $f = 40$ cm et $f' = 20$ cm, c'est-à-dire pour convergence 2,5 dioptries et 5 dioptries, et associons-les, en les plaçant l'une contre l'autre. On trouve, pour la distance focale du système, $F = 13$ cm : la convergence est donc de $\frac{1}{0,13}$ ou 7,5 dioptries; c'est la somme arithmétique des convergences partielles. Si l'on associe de même une lentille convergente et une lentille divergente, on trouve que la convergence totale est la somme algébrique des convergences partielles. Donc, d'une façon générale : *dans un système mince composé de plusieurs lentilles minces, centrées sur un même axe et accolées, la convergence totale est la somme algébrique des convergences des lentilles composantes*, c'est ce qu'on appelle le *théorème des convergences*.

Il est facile de se rendre compte de la généralité de ce théorème; en effet, soient par exemple deux lentilles accolées, de distances focales f et f', et soit F la distance focale du système.

Faisons tomber sur le système un faisceau cylindrique de rayons parallèles à l'axe principal; si la seconde lentille n'existait pas, les rayons iraient passer par le foyer-image de la première lentille, qui joue alors le rôle d'objet par rapport à la seconde. Cet objet est situé à la distance f du sommet commun aux deux lentilles; la seconde lentille donnera de cet objet, situé à la distance $p = f$ de son sommet, une image située à la distance $p' = F$ du sommet commun aux deux lentilles, cette image étant le foyer-image du système, puisqu'un

faisceau de rayons parallèles à l'axe principal vient passer par ce point après avoir traversé le système des deux lentilles. Appliquons donc la formule générale (89) à la seconde lentille ; $p_1 = f$ et $p_2 = F$, donc,

$$-\frac{1}{f}+\frac{1}{F}=\frac{1}{f'};$$

ou

$$\frac{1}{F}=\frac{1}{f}+\frac{1}{f'}$$

cette formule est aussi générale que la formule des lentilles d'où elle est tirée.

Le théorème étant vrai pour deux lentilles, le serait pour un nombre quelconque, à condition, bien entendu, que le système puisse toujours être considéré comme un système mince.

Ainsi, la réunion des deux lentilles minces, dont il est question plus haut (95), donnerait un système mince de 5 – 2 ou 3 dioptries. Ce serait l'équivalent d'une lentille convergente simple de 1/3 de m ou 33 cm de distance focale.

Les opticiens font une application du théorème précédent dans le procédé qu'ils emploient pour déterminer la distance focale d'une lentille divergente. Ils possèdent un assortiment de lentilles convergentes dont les convergences croissent par quart de dioptrie, par exemple, depuis 0,25 jusqu'à 12 ou 15 dioptries ; ils associent la lentille divergente étudiée, successivement avec chacune des diverses lentilles convergentes, jusqu'à ce qu'ils trouvent une combinaison telle que les objets extérieurs ne paraissent plus se déplacer lorsqu'on passe rapidement l'ensemble des deux verres devant l'œil. Le système se comporte alors comme une lame à faces parallèles, c'est-à-dire que sa distance focale est infinie, ou que sa convergence est nulle ; en raison de l'équation précédente, on en conclut que la distance focale cherchée de la lentille divergente est, au signe près, égale à celle de la lentille convergente employée.

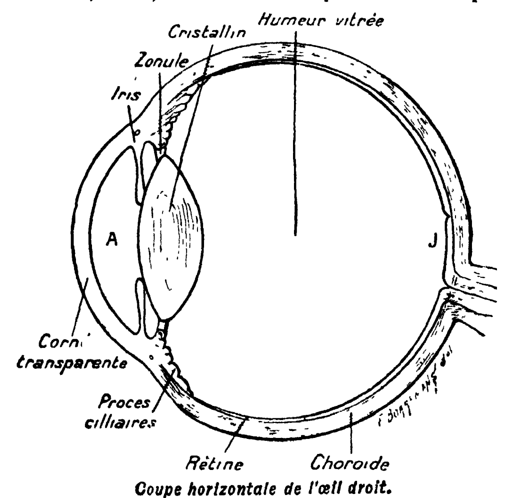
CHAPITRE IV

ŒIL. — VISION

---

97. *Constitution optique de l'œil.* — Au point de vue optique, l'œil humain est une association de surfaces sphériques centrées sur un même axe, séparant des milieux d'indices de réfraction différents. Les divers milieux de l'œil sont (*fig.* 104) :

1° La *cornée transparente*, sorte de calotte sphérique, ayant, en moyenne, une épaisseur de 0,4 mm, et une courbure plus accentuée que le reste du



Coupe horizontale de l'œil droit.

Fig. 104.

globe de l'œil ; son rayon de courbure est 8 mm ; son indice par rapport à l'air est 1,336 ;

2° L'*humeur aqueuse*, liquide situé en A derrière la cornée, et dont l'indice est très voisin de celui de la cornée transparente,

3° Le *cristallin*, sorte de lentille biconvexe, dont la face antérieure a une courbure moindre que la face postérieure ; les rayons de courbure sont $R_1 = 10$ mm et $R_2 = 6$ mm, pour l'œil regardant à l'infini. Le cristallin est formé d'une série de couches dont les indices vont en croissant de la péri-

phérie au centre, et dont la valeur moyenne est 1,388. La distance du sommet de sa face antérieure au sommet de la cornée est de 4 mm ; son épaisseur est également de 4 mm,

4° L'*humeur vitrée*, masse gélatineuse qui remplit le reste du globe de l'œil, derrière le cristallin, et dont l'indice est très voisin de celui de l'humeur aqueuse ;

5° La *rétine*, formée par un épanouissement du nerf optique sur le fond du globe de l'œil ; sa distance à la face postérieure du cristallin est de 15 mm, ce qui donne, pour la profondeur totale de l'œil moyen, 23 mm — Derrière la rétine, se trouve une membrane pigmentaire, de couleur noirâtre appelée *choroïde* (du grec *khorion*, cuir, et *eidos*, apparence) ; elle a pour effet d'absorber la lumière après qu'elle a impressionné les éléments nerveux rétiniens La choroïde se gonfle en avant pour former les *procès ciliaires*, auxquels le cristallin est attaché par l'intermédiaire des fibres de la *zonule*.

Enfin, l'œil tout entier est contenu dans une membrane blanche, qui l'enveloppe depuis la cornée transparente, et qu'on désigne sous le nom de *sclérotique* (du grec *sclêros*, dur), ou *cornée opaque*

L'*iris* est un diaphragme situé dans l'humeur aqueuse, en avant du cristallin, il est percé d'une ouverture circulaire centrée sur l'axe, qu'on nomme la *pupille*. L'iris est de nature musculaire, e jeu de ses muscles a pour effet de rétrécir ou de dilater l'ouverture de la pupille, par action réflexe, sous l'influence d'une lumière plus ou moins intense.

98. *L'œil est un système optique convergent* — Si l'on se procure un œil de bœuf, dont on use la sclérotique pour la rendre transparente, on constate qu'il se forme, sur la rétine, une image reelle et renversée des objets éloignés. Cet œil se comporte donc comme un système optique convergent, dont le foyer image serait sur la rétine. — L'œil humain, en particulier, peut être assimilé, au point de vue optique, à un *dioptre sphérique fictif dont le sommet* S *se trouverait à peu près à mi-distance entre le sommet de la cornée et le sommet de la face antérieure du cristallin, c'est-à-dire à* 3 *mm environ du sommet de la cornée* (*fig.* 105) ; *le centre optique* C *de ce dioptre serait très sensiblement au sommet de la face postérieure du cristallin, et son plan focal image* F_2 *serait normalement sur la rétine. La distance focale principale correspondante serait donc très voisine de* 20 *mm ; quant au plan focal objet* F_1 *de ce dioptre, il serait à* 15 *mm en avant de son sommet, c'est-à-dire à* 12 *mm en avant de la cornée.*

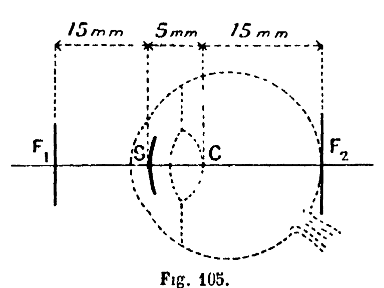


Fig. 105.

99. *Netteté de la vision.* — Une expérience très simple montre la relation qui existe entre la netteté de la vision et la position de l'image par rapport à la rétine.

On perce dans une carte deux trous O et O′ très rapprochés, à un intervalle moindre que le diamètre moyen de la pupille, qui est d'environ 4 mm. A travers cette carte, placée devant l'œil, de manière que les trous soient

disposés horizontalement (*fig.* 106), on regarde une pointe d'aiguille verticale A, placée d'abord *très près* de la carte : la vision est assez nette, mais double. Si l'on enlève la carte sans déplacer l'aiguille, la vision devient

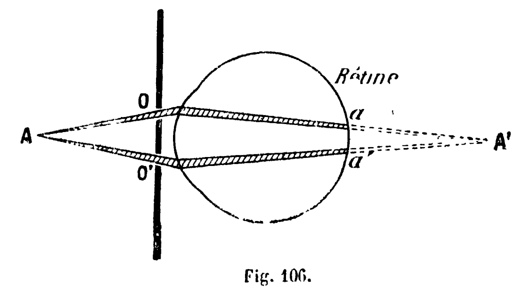


Fig. 106.

simple, mais confuse Or, sans la carte (*fig.* 107), le pinceau de rayons partis de la pointe va converger au point conjugué A', qui est situé alors derrière la rétine, puisque l'objet est très rapproché, ce pinceau couvre donc une large région *a a'* de la rétine, et l'on comprend que la vision soit confuse. Avec la carte, au contraire, les deux étroits pinceaux qui ont tra-

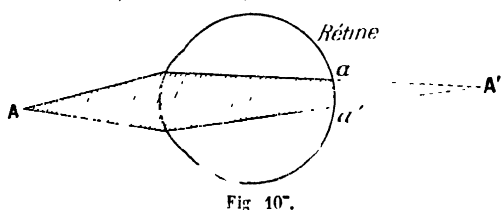


Fig 107.

versé les trous, et qui vont converger au même point conjugué, n'affectent que deux régions distinctes et très petites *a*, *a'* (*fig.* 106) de la rétine : ils produisent alors une impression double et assez nette. — Si maintenant on éloigne l'aiguille de la carte, les deux images rétiniennes se rapprochent l'une de l'autre, car le conjugué de la pointe se rapproche lui-même de la rétine, et les deux petites taches lumineuses arrivent à se confondre en une seule lorsque A', conjugué de A par rapport à l'œil, vient se former sur la rétine même. Si alors on enlève la carte, la vision reste nette ; c'est que le conjugué de la pointe est alors sur la rétine même. De ces diverses observations, il résulte donc que la *vision ne peut être nette, qu'autant que l'image d'un point n'affecte qu'une petite portion de la rétine.*

100. *Accommodation.* — L'expérience de chaque jour montre que, pour les vues ordinaires, l'œil donne une image nette des objets situés à une grande distance : ainsi, quand l'atmosphère est bien transparente, la lune apparaît avec des contours bien arrêtés. Mais, pour ces mêmes vues, la vision reste nette lorsque l'objet se rapproche de l'œil jusqu'à 20 cm environ. Il s'agit de savoir si quelque modification de l'œil n'est pas nécessaire pour expliquer cette particularité. Or, la rétine est formée de cônes et de bâton-

nets, qui constituent les terminaisons des fibres nerveuses, et reçoivent l'impression de la lumière; leur diamètre moyen est de 4 microns (4 μ), et l'on peut concevoir que l'image d'un point reste nette pour l'œil, tant que les rayons émanés de ce point n'affectent qu'un ou deux éléments rétiniens. Dès lors, pour que l'image d'un point puisse être considérée comme se formant sur la rétine, il suffit que le cône de rayons réfractés émanés de ce point ne détermine sur la rétine, qu'une petite région éclairée, de rayon au plus égal à 4 microns; c'est ce qu'on appelle le *cercle de diffusion* tolérée. Cherchons donc quel est le déplacement du point conjugué, dans l'épaisseur de la rétine, lorsque le point objet se déplace de l'infini à 20 cm.

L'œil équivaut sensiblement, avons-nous dit (98), à un dioptre unique dont le centre optique serait situé sur la face postérieure du cristallin et dont le plan focal image serait sur la rétine, les distances focales principales image et objet étant respectivement $f_2 = 20$ mm et $f_1 = -15$ mm. Dans ces conditions lorsque le point objet A est à 5 m, l'image A′ se fait à une distance p_2 du sommet du dioptre équivalent à l'œil, donnée par l'équation (85)

$$\frac{f_1}{p_1} + \frac{f_2}{p_2} = 1$$

où $f_1 = -15$ mm, $p_1 = -5000$ mm et $f_2 = 20$ mm; en résolvant par rapport à p_2, on trouve $p_2 = 20{,}06$ mm; c'est-à-dire que l'image se fait à 0,06 mm en arrière de la rétine. Les rayons réfractés par l'œil, et provenant de A forment un cône dont le sommet est en A′ et qui a pour base la pupille dont le rayon moyen est de 1 mm dans une vive lumière; ce cône détermine sur la rétine un cercle de diffusion dont le rayon ε est au rayon d'ouverture de la pupille dans le même rapport que les distances de ces sections au sommet du cône. On a donc sensiblement :

$$\frac{\varepsilon}{1} = \frac{0{,}06}{15} \quad \text{d'où} \quad \varepsilon = 0{,}004 \text{ mm ou } 4\ \mu.$$

Jusque-là, aucune modification n'est donc nécessaire pour la conservation de la netteté de la vision. — Mais il n'en est plus de même lorsque l'objet se rapproche de 5 m jusqu'à 20 cm. Lorsque le point P (*fig.* 108) se trouve

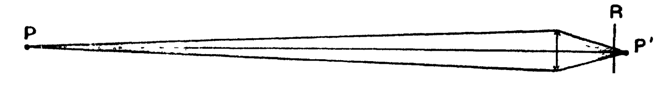


Fig. 108.

à 20 cm, un calcul analogue au précédent montre que son conjugué P′ se trouve à 1,6 mm environ derrière la rétine, distance trop considérable, d'après le calcul précédent, pour que la vision puisse rester nette. Pour maintenir dans l'épaisseur de la rétine le conjugué du point situé à 20 cm l'œil devra subir quelque modification ayant pour effet d'augmenter sa convergence : cette modification se produit grâce à un mécanisme remarquable, qui a reçu le nom d'*accommodation*.

Voici en quoi consiste cette accommodation. Autour du cristallin se trouve un anneau musculaire, appelé le *muscle ciliaire;* lorsque ce muscle se contracte, le cristallin se renfle par le milieu; ses faces diminuent de rayon c'est-à-dire augmentent de courbure, et le cristallin devient plus convergent.

C'est précisément ce qui se passe lorsque l'objet est placé trop près de l'œil ; une action réflexe de la lumière fait contracter le muscle ciliaire et détermine l'accommodation. Il résulte d'expériences très précises que le rayon de la face antérieure du cristallin peut ainsi passer de 10 mm à 6 mm, et celui de la face postérieure de 6 mm à 5,5 mm. La figure 109 traduit, à une échelle agrandie, cette modification relative de formes, qui correspond à un déplacement du foyer image d'environ 3 mm en avant de la rétine.

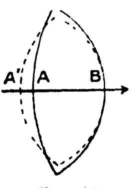


Fig. 109.

101. ***Sensibilité des diverses parties de la rétine. — Punctum cæcum. — Tache jaune. — Axe visuel.***— L'expérience montre que les diverses parties de la rétine ne présentent pas toutes une même sensibilité. A 90° de l'axe de l'œil, la sensibilité est pour ainsi dire nulle. Le point par lequel le nerf optique pénètre dans l'œil est également un point insensible, auquel on a donné le nom de *punctum cæcum* (point aveugle). — Au contraire, la partie la plus sensible de la rétine est une petite excavation entourée d'une bordure jaune (*tache jaune*) J (*fig.* 104), et principalement constituée par des cônes, au lieu de bâtonnets.

On appelle *axe visuel* la ligne qui joint le milieu de la tache jaune au centre optique de l'œil ; il fait un angle de 5° environ avec l'axe principal, de l'autre côté du nerf optique. Lorsqu'on veut examiner avec attention un point déterminé d'un objet, c'est toujours l'axe visuel que l'on dirige vers ce point. Mais, le diamètre de la tache jaune n'étant que de 0,2 mm, l'angle qu'elle sous-tend du centre optique de l'œil n'est que 0°45′ ; c'est ce qui fait, par exemple, que, pour lire des caractères de dimension moyenne, on est obligé de déplacer légèrement l'œil pour examiner successivement les diverses lettres d'un même mot.

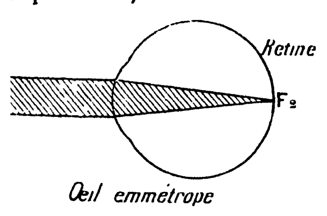


Fig. 110.

102. ***Classification des différentes sortes de vues.*** — On distingue trois espèces de vues :

1° *Emmétropie* (du grec *en*, dans, *métron*, mesure, et *ôps*, œil) ; *vue normale*. — Le plan focal image de l'œil non accommodé est exactement à la rétine (*fig.* 110). La vision peut donc être nette, sans accommodation, depuis l'infini jusqu'à une distance de quelques mètres. Pour une distance moindre, l'accommodation devient nécessaire, et elle s'effectue jusqu'à un *punctum proximum*, dont la distance à l'œil, ou *distance minimum de vision distincte*, est de 20 cm environ. Cette distance correspond au maximum d'accommodation.

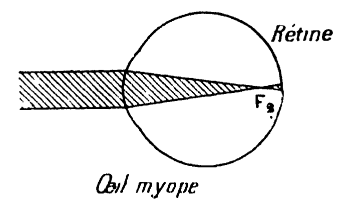
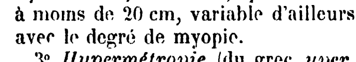


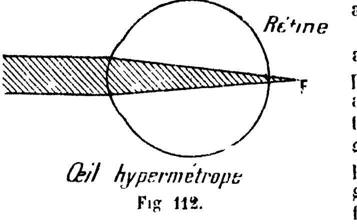
Fig. 111.

2° *Myopie* (du grec *muein*, serrer ; et *ôps*, œil). — Le plan focal image de cet œil, non accommodé, est en avant de la rétine (*fig.* 111) ; la distance focale correspondante est trop courte, c'est-à-dire que l'œil est trop convergent pour sa longueur. La vision n'est

pas nette à l'infini; elle ne commence à l'être que pour un point dont la distance est inférieure à une certaine limite : ce point est le *punctum remotum*; sa distance à l'œil est la *distance maximum de vision distincte*, distance finie chez le myope. Pour les distances moindres, la vision reste nette, par accommodation, jusqu'à un *punctum proximum*, qui est situé



à moins de 20 cm, variable d'ailleurs avec le degré de myopie.



Œil hypermétrope

Fig 112.

3° *Hypermétropie* (du grec *uper*, au delà) — Sans accommodation, le plan focal image de cet œil est en arrière de la rétine (*fig.* 112); la distance focale correspondante est trop grande c'est-à dire que l'œil n'est pas assez convergent pour sa longueur, l'œil non accommodé ne peut faire converger sur la rétine que des faisceaux déjà convergents · le *punctum remotum* est alors virtuel L'accommodation est déjà nécessaire pour ramener ce plan focal sur la rétine, c'est-à-dire pour que la vision devienne nette à l'infini. Puis, l'accommodation se continuant, la vision reste nette jusqu'à un *punctum proximum*, plus éloigne que pour l'œil emmétrope.

103 ***Presbytie.*** — La faculté d'accommodation s'atténue généralement avec l'âge, le *punctum proximum* s'éloigne donc peu à peu dans la vieillesse. Ce défaut qu'on appelle la *presbytie* (du grec *presbus*, vieillard) peut d'ailleurs affecter les trois espèces de vues Si on le suppose arrivé à sa limite, on peut dire que le *punctum proximum* est allé rejoindre le *punctum remotum*; la distance de ce point à l'œil est alors la seule distance de vision distincte

104 ***Correction des défauts optiques de l'œil*** — Pour corriger la *myopie*, il faut rendre l'œil capable de voir au loin : nous savons qu'il est trop convergent pour cela, on lui associera donc une lentille *divergente*

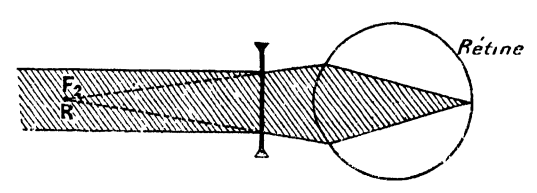


Fig. 113

(*fig.* 113). — Quant au choix de cette lentille, nous remarquerons qu'elle doit amener les images des objets éloignés à se faire, au plus, au *punctum remotum* R Or, une telle lentille donne, d'un objet plus ou moins éloigné, une image située au plus dans son plan focal image; le foyer image F_2 de la lentille doit donc coïncider avec le *punctum remotum* R de l'œil. Par suite, si l'on désigne par f la distance focale en valeur absolue, et par D la distance du *punctum remotum* de l'œil, on doit prendre, abstraction faite de la distance de la lentille à l'œil, $f = D$ (*).

(*) Les oculistes donnent aux lentilles de correction un ***numéro n*** qui exprime la convergence du verre correcteur en dioptries (95).

La figure 113 rend compte de l'influence de cette lentille divergente L sur la marche d'un pinceau de rayons lumineux parallèle à l'axe commun de la lentille et de l'œil Après réfraction par la lentille, ces rayons semblent

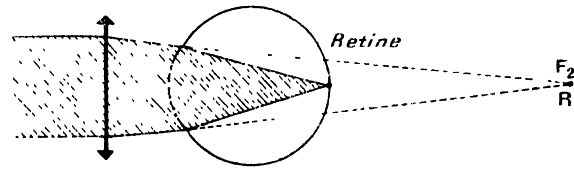


Fig 114.

émaner du foyer image virtuel F_2 mais comme ce point coïncide avec le *punctum remotum* R, ces rayons après réfraction par l'œil vont, sans aucune accommodation, converger sur la rétine.

Dans l'*hypermétropie*, la correction la plus importante consiste, au contraire, à rendre l'œil capable de voir les objets situés plus près que son *punctum proximum* trop éloigné Or, ce qui cause cet éloignement, c'est un défaut de convergence; il faudra donc associer à cet œil une lentille *convergente* (*fig.* 114) Quant au choix de cette lentille, il dépendra de la distance des objets soumis à l'observation, c'est-à dire de la nature des occupations de chaque observateur. La distance focale image f de la lentille devra être telle qu'elle amène les images de ces objets à se faire au *punctum remotum* R, afin d'éviter à l'œil la fatigue due à l'accommodation. Si l'on désigne par d la distance du *punctum remotum* qui dans ce cas est virtuel (102), et par x la distance des objets, en remarquant qu'ici l'image serait réelle, mais fonctionnerait comme un objet virtuel et *en explicitant les signes de* p_1 *et de* p_2 *dans la formule habituelle* (89), on a la relation arithmétique.

$$-\frac{1}{-x}+\frac{1}{d}=\frac{1}{f}.$$

Enfin, la correction de la *presbytie* est analogue a la correction de l'hypermétropie . il s'agit de rendre possible la vision des objets rapprochés qu empêche une convergence devenue insuffisante , on emploiera donc une lentille *convergente* convenable En particulier, un myope devenu presbyte emploiera une lentille convergente pour regarder en deçà de sa distance de vision nette, c'est-à-dire les objets dont son œil donnerait des images en arrière de la rétine, et une lentille divergente pour regarder au delà les objets dont son œil donnerait des images en avant de la rétine

105. ***Persistance des impressions lumineuses.*** — Chacun sait que les impressions lumineuses ne s'éteignent pas en même temps que la cause extérieure qui les a produites; et l'expérience montre que, dans les conditions les plus ordinaires, la durée de persistance est de l'ordre de grandeur du dixième de seconde. — C'est cette propriété physiologique que l'on utilise dans les projections cinématographiques, pour la reproduction de scènes animées. On projette très rapidement à la suite l'une de l'autre les photographies successives d'une même scène se passant dans un cadre déterminé :

par suite de la persistance de l'impression lumineuse sur la rétine, le cadre paraît fixe sur l'écran, et les divers objets qui se déplacent semblent animés de mouvements continus.

106. *Vision binoculaire — Points correspondants.* — Lorsqu'on fixe un petit objet avec les deux yeux à la fois, on fait converger les axes visuels des deux yeux (101) vers le point qui attire plus particulièrement l'attention : l'objet visé est alors vu *simple*, bien qu'il y ait, en réalité, deux impressions produites sur les deux rétines. Mais, si les yeux ainsi fixés aperçoivent, en même temps, d'autres objets situés dans le voisinage, plus près ou plus loin que celui que l'on vise, ces objets sont vus *doubles*. Donc, pour que les impressions produites sur les deux rétines par un point extérieur se confondent en une perception unique, il faut que ces deux impressions se fassent en des points déterminés que l'on appelle des *points correspondants*. En particulier, les taches jaunes des deux yeux sont des points correspondants

107. *Perception du relief.* — La vision binoculaire est la principale cause de la sensation du relief. Les deux yeux ne voient pas tout à fait de la même façon un corps présentant une certaine épaisseur : c'est la perception simultanée de ces deux perspectives qui produit en nous l'impression d'une image unique, avec sensation prononcée de *relief*. — La preuve qu'il en est bien ainsi, c'est l'illusion produite dans le *stéréoscope* (du grec *stéréos*, solide ; et *scopeô*, j'examine) : deux figures perspectives M et M′ (*fig.* 115) d'un même objet (généralement deux photographies), représentant chacune l'objet vu par l'un des yeux, sont amenées, au moyen de lentilles et de prismes L et L′, dont la distance est égale à l'écartement des yeux, à former deux images virtuelles qui se superposent en M″ : la vision simultanée de ces deux images, par les deux yeux O et O′, produit la sensation du relief.

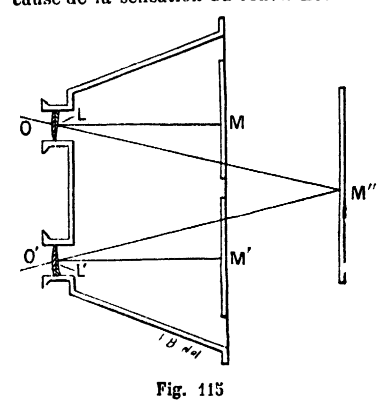


Fig. 115

108. *Angle optique.* — Quand les deux yeux sont dirigés simultanément vers un point, on appelle *angle optique* l'angle que forment entre eux les deux axes visuels ; cet angle est d'autant plus petit que le point est plus éloigné. Or, pour chacun de nous, le sens du toucher a donné au sens de la vue une sorte d'éducation, d'après laquelle nous avons conscience de la valeur de l'angle optique quand nos deux yeux sont fixés, par exemple, sur un point situé à 30 ou 40 cm ; à mesure que cet angle devient plus petit, nous jugeons que la *distance* du point augmente. Ce phénomène concourt, avec l'appréciation des diamètres apparents, pour l'évaluation des distances. — Mais ces évaluations deviennent très incertaines, quand il s'agit de points très éloignés ; l'angle optique est alors très petit, et ne varie plus que de quantités insensibles avec la distance. C'est ainsi que nous ne pouvons nous faire aucune idée de la distance des astres, ni même d'un phare un peu éloigné.

CHAPITRE V

INSTRUMENTS D'OPTIQUE

I. — Notion de diamètre apparent d'un objet. Acuité visuelle.

109. ***Diamètre apparent d'un objet. — Notion de perspective.*** — L'étude expérimentale de l'œil au point de vue optique a montré (98) qu'il se comporte comme un *dioptre unique convergent* (85) donnant, des objets extérieurs que l'on regarde, une image réelle et renversée. Cette image se forme sur la *rétine*, sorte d'écran nerveux placé au fond de l'œil et sensible aux rayons lumineux.

La condition optique de vision nette des objets est que l'image réelle donnée par l'œil vienne se peindre *exactement* sur la rétine, d'où le nom *d'image rétinienne* sous laquelle on la désigne.

Pour les vues que l'on rencontre le plus communément, les vues *normales*, comme l'on dit, l'expérience journalière montre que cette condition est remplie naturellement lorsque l'objet est très éloigné, en pratique à l'infini : *l'œil normal est naturellement disposé pour voir à l'infini.* Ces vues normales possèdent une propriété importante : grâce à une faculté de l'œil appelée *faculté d'accommodation* (100), la condition de vision nette est encore remplie pour un objet situé à distance *finie*, pourvu que cette distance ne soit pas inférieure à celle d'un certain point que l'on a appelé pour cette raison le *punctum proximum*, et qui est situé à une vingtaine de centimètres de l'œil. Un observateur doué d'une telle vue peut donc voir nettement dans toute la région de l'espace comprise entre 20 cm environ et l'infini.

Dans l'étude de l'œil et dans celle des instruments d'optique une notion importante est celle de *diamètre apparent* d'un objet.

On désigne sous le nom de *diamètre apparent* d'un objet linéaire

AB (*fig.* 116), dans une position déterminée, l'*angle* ACB $=\theta$ *formé par les droites menées du centre optique* C *du dioptre sphérique équivalent à l'œil, aux extrémités* A et B *de l'objet*. Si l'objet

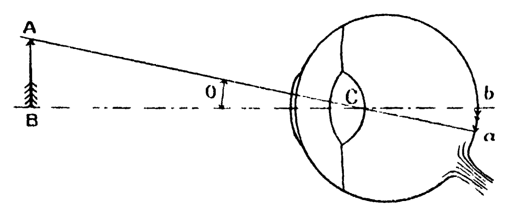


Fig 116.

est perpendiculaire à l'axe de l'œil et limité à cet axe, la tangente de l'angle θ a pour mesure le rapport de la longueur de l'objet à sa distance à l'œil.

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{AB}{CB}.$$

Mais le diamètre apparent de ce que l'œil voit nettement est toujours très petit. On peut donc remplacer la tangente par l'angle évalué en radians (26, *Note*) et écrire

$$\theta = \frac{AB}{CB},$$

le diamètre apparent varie proportionnellement à la grandeur de l'objet, et en raison inverse de sa distance à l'œil.

Quand l'œil compare deux objets *situés à une même distance*, c'est par le rapport de leurs diamètres apparents qu'il juge du rapport de leurs grandeurs.

Remarquons d'autre part que, si un même objet, de grandeur connue, un homme, un cheval, etc., est placé à des distances variables, son diamètre apparent diminue à mesure qu'il s'éloigne. Il est donc possible d'évaluer les distances approximativement par la perception du diamètre apparent de cet objet particulier. C'est en cela que consiste la notion de *perspective*, qu'il ne faut pas confondre avec la notion de *relief*; celle-ci dépend de la vision binoculaire (106).

110. ***Visibilité des détails d'un objet à l'œil nu. — Pouvoir séparateur de l'œil, ou acuité visuelle.*** — La visibilité des détails d'un objet vu à l'œil nu est naturellement d'autant plus grande que l'image rétinienne est plus grande elle-même. Or, pour une dimension linéaire donnée, prise sur l'objet, la grandeur *ab* de l'image dépend de son *diamètre apparent* (109). Soient y une dimension de

l'objet AB (*fig.* 117) placé à la distance D, y' la dimension correspondante de l'image rétinienne ab, située à la distance δ du centre optique C de l'œil ; on a :

$$\frac{y'}{y} = \frac{\delta}{D}, \quad \text{d'où} \quad y' = \delta \frac{y}{D}.$$

d'autre part, le diamètre apparent θ de cette dimension étant toujours assez petit, on peut poser :

$$\frac{y}{D} = \theta, \quad \text{donc} \quad y' = \delta\theta ;$$

L'image rétinienne d'un objet varie proportionnellement au

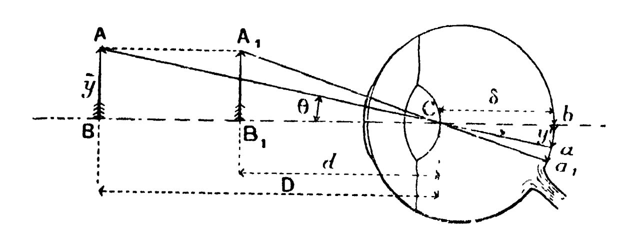


Fig. 117.

diamètre apparent de cet objet, c'est-à-dire en raison inverse de sa distance à l'œil.

Le diamètre apparent θ, et par conséquent la dimension de l'image rétinienne y', atteindront leur plus grande valeur lorsque l'objet sera à la distance d du *punctum proximum*, en A_1B_1 : l'image rétininienne est alors a_1b la plus grande possible. C'est donc en ce point que chaque observateur devra tendre à placer un objet, pour en distinguer le mieux possible les détails à l'œil nu.

On appelle *pouvoir séparateur* de l'œil, ou *acuité visuelle*, la plus petite valeur que puisse présenter le diamètre apparent θ d'une dimension linéaire, pour que ses extrémités soient vues séparément. Plus ce diamètre apparent limite est petit, plus l'acuité visuelle est grande. — Pour l'œil moyen, l'expérience a montré que le pouvoir séparateur est d'environ 1 minute. Cela revient à dire que l'on peut distinguer l'un de l'autre deux traits distants de 0,1 mm, et placés à une distance de l'œil égale à 34 cm (l'angle égal à une minute vaut, en effet, $\frac{1}{3437}$ radian).

II. — Instruments d'optique.

111. ***Instruments d'optique en général.*** — Les instruments d'optique sont des auxiliaires de la vision, destinés à nous faire voir les objets sous un diamètre apparent plus grand qu'à l'œil nu, pour mieux en percevoir les détails. On peut les ranger en deux catégories :

1° Les instruments destinés à l'observation des objets dont on peut à volonté faire varier la distance, pour permettre de distinguer des détails qui tombent au-dessous de l'acuité visuelle de l'œil nu : ces instruments sont les *loupes* et les *microscopes*.

2° Les instruments destinés à l'observation des objets placés à des distances fixes, et pour lesquels un accroissement de diamètre apparent équivaudra à un rapprochement : ce sont les *lunettes*.

112. ***Loupe.*** — La loupe est une lentille convergente, de petite distance focale, que l'on place entre l'œil et les objets pour en mieux distinguer les détails. Pour concevoir l'utilité de la loupe, on remarquera que, lorsqu'on cherche à distinguer à l'œil nu les détails d'un objet, on est conduit à le rapprocher progressivement de l'œil, car le diamètre apparent, par suite l'image rétinienne, grandit en raison inverse de la distance. Mais, pour que la vision soit nette, il faut que l'objet soit toujours placé à une distance au moins égale à la distance *d* du *punctum proximum* (109). — L'interposition d'une lentille *convergente*, de distance focale *f* plus petite que *d*, en permettant de placer l'objet à une distance de l'œil inférieure à *d*, a pour effet de substituer à l'objet une image virtuelle, plus éloignée mais plus grande, et dont le diamètre apparent est supérieur à celui qu'aurait l'objet vu à l'œil nu, à la distance *d*.

Soit une lentille convergente, S son centre optique (*fig.* 118), F_1 et F_2 ses foyers principaux. D'après ce qu'on a vu (78, 3°), pour qu'un objet AB donne une image virtuelle, il faut que la distance SB soit moindre que la distance focale principale SF_1; la figure 118 indique la construction géométrique de cette image. L'œil, placé dans le voisinage immédiat de la loupe, reçoit la plus grande partie des faisceaux lumineux émis sur la lentille par les divers points de AB, comme s'ils émanaient des points correspondants de A'B'.

L'opération de la *mise au point* consiste à régler la distance SB de l'objet à la lentille de façon que l'image A'B' puisse être vue nettement ; il faut pour cela qu'elle se trouve située dans les limites de la vision distincte, c'est-à-dire au delà du *punctum proximum* de l'observateur.

Lorsqu'on cherche à mettre au point l'image fournie par une

loupe, on s'aperçoit qu'on ne peut déplacer que très peu l'objet, sans cesser de voir nettement l'image. Il semble donc que l'œil ait perdu la faculté d'accommodation (109). L'explication est tout autre; un très petit déplacement de l'objet, au voisinage du foyer objet, entraîne pour l'image un déplacement considérable, puisque le déplacement entre le foyer et la loupe fait varier la position de l'image depuis l'infini jusqu'à la loupe. On conçoit donc qu'un très petit déplacement suffise pour mettre en jeu toute la faculté d'accommodation, depuis le *punctum proximum* jusqu'à l'infini. — C'est ce très petit déplacement que l'on appelle la *latitude de mise au point* de la loupe.

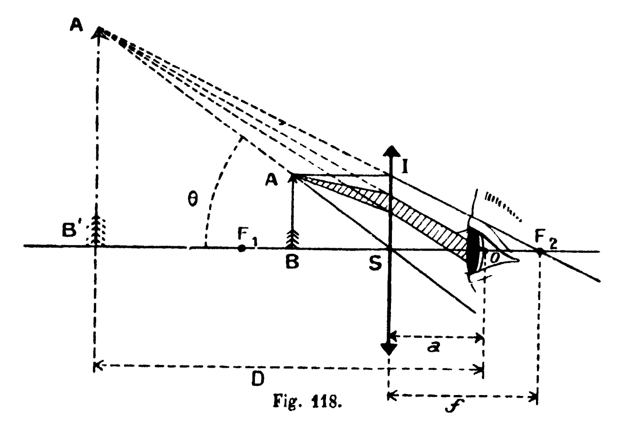


Fig. 118.

On trouve, par exemple que, pour un œil normal et une loupe de 2 cm de distance focale, la latitude de mise au point n'est que de 2 mm environ(*).

113. Puissance. — On appelle *puissance* de la loupe *le quotient du diamètre apparent de l'image, telle qu'on la voit, par la longueur de l'objet.* Comme la grandeur linéaire de l'image rétinienne est proportionnelle au diamètre apparent, la puissance de la loupe caractérise donc, dans la vision avec cet instrument, la dimension de l'image rétinienne d'un objet dont la longueur est égale à l'unité; par suite, une loupe permet de distinguer des détails d'autant plus petits que sa puissance est plus grande.

Si l'on remarque que, par suite de la faible latitude de mise au point, l'objet est toujours placé très près du foyer F_1 (*fig.* 118), on peut admettre qu'il est exactement au foyer et que son image est à l'infini. L'angle sous lequel cette image est vue est donc l'angle $\theta = ASF_1$, *quelle que soit la position de l'œil.* Cet angle

(*) Il est commode de se servir, pour ce calcul, de la formule de Newton (92).

étant très petit, on peut le confondre avec sa tangente et écrire

$$\theta = \frac{AB}{SF_1} = \frac{AB}{f},$$

en appelant f la distance focale de la loupe; la puissance P aura donc pour valeur, d'après sa définition

$$P = \frac{\theta}{AB} = \frac{AB}{f} : AB = \frac{1}{f}.$$

Il est à noter que cette expression resterait la même si l'œil avait son centre optique au foyer-image; car alors l'angle sous lequel l'œil verrait l'objet serait l'angle IF_2S, *quelle que fût la distance de mise au point*, et cet angle a également pour mesure $\frac{IS}{f} = \frac{AB}{f}$.

Nous avons déjà rencontré l'expression $\frac{1}{f}$ dans une lentille, sous le nom de convergence (95), et nous avons mesuré cette grandeur en *dioptries*, en évaluant f en *mètres*. On pourra donc également évaluer la puissance en dioptries. — Toutefois, si l'on veut, dans ce cas, se servir de la valeur de la puissance pour calculer l'angle Pz sous lequel on aperçoit une dimension z de l'objet, il ne faut pas oublier de satisfaire à la double condition suivante : 1° n'employer la puissance qu'au calcul de l'angle sous lequel est vue une *très petite longueur* z; en effet, l'angle ainsi évalué en radians représente en réalité sa tangente (44); il faut donc que l'angle en question ait son arc assimilable à sa tangente; 2° évaluer z en *mètres*; car, en effet, cet angle est Pz, ou $\frac{z}{f}$ et, dans cette expression de la mesure d'un angle en radians, z et f doivent évidemment être évalués avec la même unité. Soit par exemple $f = 1$ cm, ou $P = \frac{1}{0,01} = 100$ dioptries; l'angle sous lequel est vu 1 mm est alors, en radians, $0,001 \times 100 = 0,1$. En transformant cette mesure en degrés et minutes sexagésimales, on trouve 5° 44′, ou, en grades et minutes centésimales, 6,36 ⁽ᵍ⁾.

Calculons l'expression de la puissance dans le cas général, pour faire voir qu'elle ne diffère jamais sensiblement de la quantité $\frac{1}{f}$.

Désignons par a la distance du centre optique o de l'œil à la loupe, par D la distance pour laquelle l'œil est accommodé, et par P la puissance. Considérons l'image A′B′ de la figure 118 comme se confondant avec un arc de cercle, décrit du centre optique de l'œil comme centre, avec D comme rayon; l'angle sous lequel on aperçoit cette

image a pour mesure $\frac{A'B'}{D}$, et la puissance a pour expression

$$P = \frac{A'B'}{D} : AB = \frac{A'B'}{AB} \cdot \frac{1}{D}.$$

Or, dans les triangles semblables $A'B'F_2$ et SIF_2, on a :

$$\frac{A'B'}{IS \text{ ou } AB} = \frac{B'F_2}{SF_2 \text{ ou } f};$$

mais $$B'F_2 = D - a + f,$$

donc $$\frac{A'B'}{AB} = \frac{D - a + f}{f}.$$

En remplaçant dans l'expression de P, il vient

$$P = \frac{D - a + f}{Df} = \frac{1}{f}\left(\frac{D - a + f}{D}\right) = \frac{1}{f}\left(1 + \frac{f - a}{D}\right).$$

Or, dans la pratique, la quantité $\frac{f-a}{D}$ est toujours petite par rapport à l'unité.

Si l'on a $f > a$, c'est-à-dire si le centre optique de l'œil est situé entre la loupe et son foyer F_2, la puissance P est d'autant plus grande que D est plus petit. Il convient donc, dans ce cas, de faire la mise au point au *punctum proximum*, c'est-à-dire de rapprocher l'image le plus possible; pour cela, il faut rapprocher le plus possible l'objet de la loupe.

Si l'on a, au contraire, $f < a$, c'est-à-dire si le centre optique de l'œil est placé au delà du foyer F_2, on peut écrire

$$P = \frac{1}{f}\left(1 - \frac{a - f}{D}\right),$$

et l'on voit que la puissance est d'autant plus grande que le terme soustractif dans la parenthese est plus petit, c'est-à-dire que D est plus grand. Dans ce cas, il convient donc de faire la mise au point à l'infini, c'est-à dire d'écarter le plus possible l'objet de la loupe. C'est ce qui arrive en général dans les loupes de dissection, à court foyer, et cela est avantageux, car on évite ainsi la fatigue d'accommodation.

Enfin, si l'on a $f = a$, c'est-à-dire si l'œil a son centre optique exactement au foyer F_2, la puissance a simplement pour expression $\frac{1}{f}$, comme nous l'avons établi directement plus haut.

114. ***Grossissement.*** — Dans tout instrument d'optique, le grossissement angulaire est le rapport du diamètre apparent de l'image,

mise au point dans l'instrument, au diamètre apparent de l'objet regardé à l'œil nu. Dans le cas où l'on dispose de la distance de l'objet, l'observation à l'œil nu doit être considérée comme faite dans les meilleures conditions possibles, c'est-à-dire à la distance d du *punctum proximum* (109). Comme la grandeur linéaire de l'image rétinienne est proportionnelle au diamètre apparent correspondant (109), le grossissement exprime donc le nombre de fois que l'image rétinienne est multipliée linéairement par l'emploi de la loupe. Le grossissement de la loupe n'exprime donc que l'avantage *relatif* de cet instrument pour une vue déterminée, tandis que la puissance (113) en exprime l'avantage *absolu*, pour toute espèce de vue. Si l'on désigne le grossissement par G, on a :

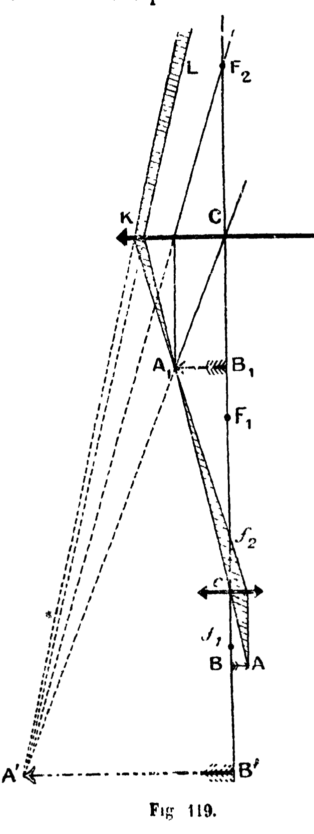


Fig 119.

$$G = \frac{A'B'}{D} : \frac{AB}{d} = \frac{A'B'}{AB} \cdot \frac{d}{D}.$$

Mais (113) $\frac{A'B'}{AB} \cdot \frac{1}{D}$ est l'expression de la puissance P, donc :

$$G = Pd = \frac{d}{f}$$

Le *grossissement de la loupe est le produit de sa puissance par la distance minimum de vision distincte.* — Dans cette expression, P étant exprimé en dioptries, d doit être évalué en mètres. Ainsi pour une loupe de 100 dioptries et une distance minimum de vision distincte égale à 20 cm, on a :

$$G = 100 \times 0{,}20 = 20.$$

115. ***Principe du microscope.*** — Le *microscope* est formé par la réunion d'un *objectif* convergent, disposé de manière à donner une image réelle et renversée, plus grande que l'objet, et d'un *oculaire* fonctionnant par rapport à cette image aérienne comme une loupe, c'est-à-dire lui substituant une image virtuelle qui est encore agrandie.

La figure 119 indique la marche des rayons : *c* est l'objectif, que nous supposerons simple, et dont les foyers très rapprochés sont en f_1 et en f_2; C est l'oculaire, que nous supposerons également simple, et dont les foyers sont en F_2 et en F_1. — L'objet AB, placé à une distance Bc de l'objectif *un peu supérieure à la distance focale principale* f_1c, donne une image réelle A_1B_1, renversée et agrandie. L'oculaire est placé à une distance B_1C de l'image A_1B_1, *inférieure à sa distance focale principale* F_1C; les rayons qui se sont croisés aux différents points de l'image aérienne A_1B_1 se comportent, par rapport à l'oculaire, comme s'ils émanaient d'un objet placé en A_1B_1 : il se forme une image A'B', visible pour l'œil placé derrière l'oculaire. — On *met au point, en déplaçant tout l'instrument par rapport à l'objet*, afin de régler la distance Bc de manière que l'image virtuelle A'B' soit vue nettement.

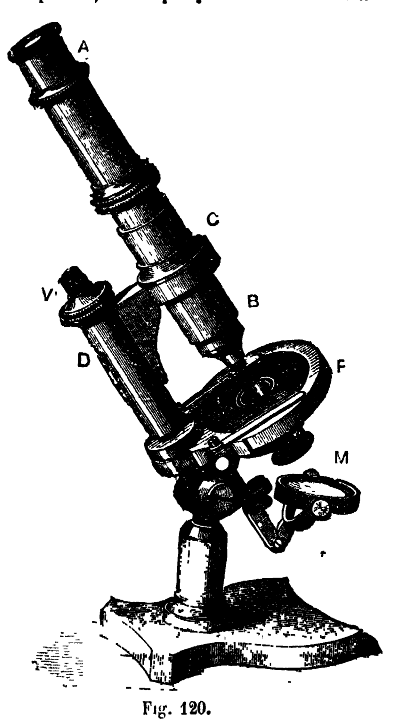


Fig. 120.

116. *Détails de construction du microscope.* — L'oculaire et l'objectif sont assujettis dans un tube métallique AB, supporté par un collier C (*fig.* 120); les objets, placés entre deux lames de verre mince, sont déposés sur la plaque P ou *porte-objet*, au-dessus d'une ouverture circulaire pratiquée en son milieu. Lorsque les objets sont transparents, on les éclaire en dessous, au moyen d'un miroir concave M, sur lequel on reçoit la lumière des nuages ou celle d'une lampe, et qui renvoie cette lumière dans l'ouverture du porte-objet. Lorsque les objets sont opaques, on les éclaire par la partie supérieure, au moyen d'une lentille convergente placée latéralement. — Le collier C, qui soutient le tube du microscope, est fixé à la colonne creuse D; une vis V, placée dans l'axe de cette colonne, permet de faire monter ou descendre la colonne elle-même, de manière à éloigner ou

à rapprocher le tube AB du porte-objet, pour mettre au point.

117. ***Latitude de mise au point.*** — La latitude de mise au point dans le microscope, c'est-à-dire le déplacement que l'on peut faire subir à l'objet sans cesser de voir l'image, est encore beaucoup plus faible que dans la loupe (112). Il est facile de s'en rendre compte. Le déplacement de l'objet AB doit être tel que le déplacement de A_1B_1 corresponde à la latitude de mise au point de la loupe oculaire. Or, l'objet AB étant au voisinage du foyer-objet f_1 de l'objectif, on sait qu'un déplacement très petit de AB peut donner naissance à un déplacement très grand de A_1B_1. Comme ce dernier déplacement doit déjà être lui-même très faible (112), il en résulte que celui de AB est pour ainsi dire insignifiant (quelques millièmes de millimètre). C'est là une des particularités du microscope: lorsqu'il a été mis au point par un œil quelconque, il est au point pour toutes les vues. — On conçoit que, pour réaliser cette mise au point, il soit nécessaire de déplacer le microscope au moyen d'une vis micrométrique; c'est ce qu'on fait avec la vis V, qui, le plus souvent, est à tête divisée, pour permettre des mesures de longueur.

118. ***Puissance.*** — Un microscope, de même qu'une loupe, doit être considéré comme d'autant plus puissant qu'il permet de voir sous un angle plus grand l'unité de longueur de l'objet.

Désignons par P la puissance du microscope et par p celle de son oculaire. L'angle sous lequel on voit l'objet AB à travers le microscope est donc $P \times AB$; mais cet angle est celui sous lequel l'oculaire permet de voir l'image A_1B_1. On a donc :

$$P . AB = p . A_1B_1,$$

d'où

$$P = p . \frac{A_1B_1}{AB};$$

mais le rapport $\frac{A_1B_1}{AB}$ est le grandissement γ (90) de l'objectif. Il en résulte donc :

$$P = p\gamma;$$

la puissance du microscope est égale au produit du grandissement de son objectif par la puissance de son oculaire.

Soit, par exemple, un oculaire d'une puissance de 50 dioptries associé à un objectif d'un grandissement égal à 20, la puissance du microscope sera de 1000 dioptries.

Soient (fig. 119) L la distance Cc, f' la distance focale de l'oculaire et f celle de l'objectif, on a $\gamma = \frac{A_1B_1}{AB} = \frac{cB_1}{cB} = \frac{L - f'}{f}$ sensiblement,

car B_1 est très voisin de F_1 et B très voisin de f_1 ; d'ailleurs $p = \frac{1}{f}$,

donc,

$$P = \frac{L - f'}{ff'} = \text{sensiblement } \frac{L}{ff'},$$

f' étant petit par rapport à L.

Pour avoir P en dioptries, L, f et f' doivent être évalués en mètres. Supposons, par exemple, L = 20 cm, $f' = 1$ cm. et $f = 2$ cm On a

$$P = \frac{0,20}{0,01 \times 0,02} = 1000 \text{ dioptries}$$

L'angle sous lequel ce microscope permet d'apercevoir 0,01 mm est donc, en radian, $1000 \times 0,0001 = 0,01$. En transformant cette mesure, on trouve 0°34′ ou 0,63 grade.

119. ***Grossissement.*** — Le grossissement G du microscope a la même définition et s'exprime par la même formule $G = P.d$ que dans la loupe (114), où P est la puissance du microscope et d la distance du *punctum proximum*.

120. ***Grandissement.*** — Le grandissement d'un microscope est le rapport $\frac{A'B'}{AB}$ d'une dimension linéaire de l'image à la dimension correspondante de l'objet. Ce rapport peut s'écrire $\frac{A'B'}{A_1B_1} \cdot \frac{A_1B_1}{AB}$. Sous cette forme, on voit qu'il est égal au produit du grandissement de l'objectif par le grandissement de l'oculaire.

Si la mise au point est faite au punctum proximum, le grandissement est égal au grossissement G, car, d'apres la définition même du grossissement (114), on a, dans ce cas :

$$G = \frac{A'B'}{d} : \frac{AB}{d} = \frac{A'B'}{AB}.$$

C'est précisément dans ces conditions que l'on se place toujours pour faire la mesure expérimentale du grossissement.

121. ***Mesure expérimentale du grandissement ou du grossissement d'un microscope, au moyen de la chambre claire.*** — La figure 121 montre comment on peut obtenir une mesure expérimentale du grandissement d'un microscope, au moyen d'une *chambre claire*.

Un bloc de verre parallélépipédique ABCD se fixe au-dessus de l'oculaire L. Les faces AB et DC sont perpendiculaires à l'axe du microscope, les faces BC et AD sont inclinées à 45°. Sur la face AD est collé un très petit prisme p, dont une face parallèle à AB

constitue avec celle-ci une lame à faces parallèles, à travers laquelle l'œil voit l'objet BA placé sous l'objectif l du microscope.

D'autre part, si l'on dispose une feuille de papier P au-dessous du prisme ABCD, à une distance égale à la distance d du *punctum proximum*, les rayons envoyés par cette feuille se réfléchissent sur la face hypoténuse BC, puis sur la face AD, et arrivent à l'œil suivant les mêmes directions que les rayons venus de l'objet. Pour l'observateur, l'image virtuelle de l'objet, fournie par le microscope, semblera donc se peindre sur la feuille de papier.

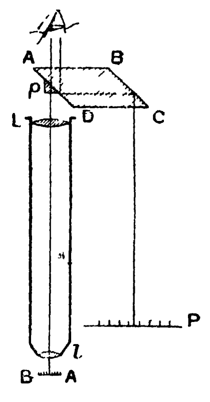
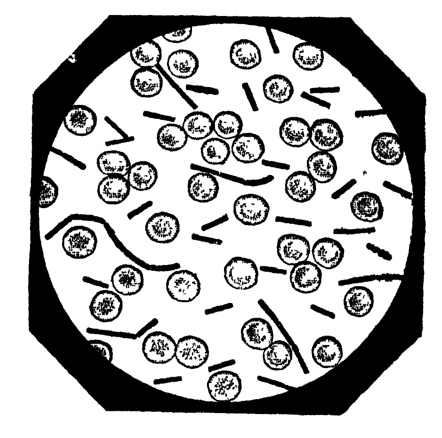


Fig 121

Pour mesurer le grandissement de l'instrument, on place sur le porte-objet un *micromètre*, consistant en une lame de verre sur laquelle le constructeur a tracé, à l'aide d'une machine spéciale, des traits distants entre eux de 0,01 mm, et l'on dispose sur la feuille de papier une règle divisée en millimètres; puis on met au point de façon que l'image des divisions du micromètre se projette exactement sur les divisions de la règle. Supposons, par exemple, que 3 divisions de la règle soient couvertes par une division grandie du micromètre : l'objet a pour dimensions 0,01 mm et son image 3 mm; le grandissement réalisé est donc

$$\frac{3}{0,01} = 300.$$

Si l'on substitue au micromètre un petit objet, on pourra suivre sur le papier, avec la pointe d'un crayon, les contours de son image, et en obtenir un dessin fidèle à un grandissement donné, qui permettra d'en déterminer les dimensions linéaires. La figure 122, ainsi obtenue, représente les globules du sang et la bactérie charbonneuse, à un grandissement de 500 diamètres. — Au lieu de dessiner à la chambre claire l'image d'un


Fig. 122.

objet microscopique, on peut le photographier, en combinant le microscope avec une chambre noire photographique, et en rendant réelle l'image définninitive, par un tirage convenable de l'oculaire. C'est la *microphotographie*.

Connaissant le grandissement du microscope, on a, par cela même, le grossissement G pour l'œil qui a fait la mesure, puisque la mise au point a été faite au *punctum proximum* (120) : par conséquent, en divisant ce grossissement par la distance minimum d de vision distincte, évaluée en mètres, on aura la puissance de l'appareil en dioptries. — On peut encore déterminer la puissance au moyen de la formule $P = p\gamma$ (118), en déterminant séparément p et γ.

On a généralement, pour un même microscope, plusieurs systèmes d'objectifs et plusieurs systèmes d'oculaires, que l'on peut substituer les uns aux autres pour faire varier le grandissement et la puissance de l'instrument (*).

122. *Objectifs et oculaires complexes employés dans les microscopes.* — Les *objectifs* de microscope ne sont jamais simples. Ils sont en général formés de trois ou quatre lentilles *plan-convexes*, tournant toutes leurs faces planes du côté de l'objet. La figure 123 donne la coupe agrandie d'un de ces objectifs. — Les premières lentilles donnent, de l'objet AB, des images successives virtuelles, et la dernière donne l'image réelle qu'on examine avec l'oculaire. Si les lentilles sont convenablement choisies et convenablement placées, l'expérience montre que l'angle $l_1 B l'_1$ d'ouverture des pinceaux lumineux tombant sur le premier verre peut être très considérable sans qu'il en résulte de mauvaises images.

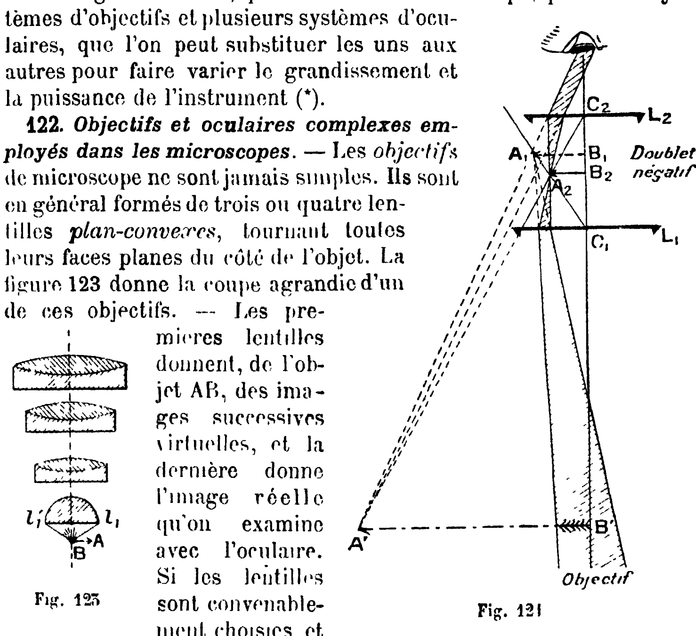


Fig. 123

Fig. 124

Les *oculaires* employés ne sont pas non plus des oculaires simples, mais des *doublets*, c'est-à-dire des oculaires composés de deux len-

(*) Le maximum de puissance que l'on ait pu réaliser dans le microscope est de 5000 à 6000 dioptries, ce qui, pour une distance minimum de vision distincte de 20 cm, correspond à un grossissement de 1000 à 1200.

tilles, de distances focales convenables et convenablement espacées. Le doublet utilisé dans le microscope se compose de deux lentilles dont la première L_1 (*fig.* 124), de centre optique C_1, empêche la formation de l'image A_1B_1 fournie par l'objectif; cette image A_1B_1 joue le rôle d'objet virtuel par rapport à la lentille L_1; cette lentille en donne l'image réelle A_2B_2, dont la lentille L_2 de centre optique C_2, donne à son tour l'image définitive virtuelle A'B'. Un tel doublet est appelé *oculaire négatif*, parce que sa première lentille supprime l'image fournie par l'objectif. Le doublet négatif a été imaginé par Huygens (*) A égalité de puissance, il donne de bien meilleures images qu'un oculaire simple, ou oculaire de Képler.

123. ***Principe de la lunette.*** — La lunette est destinée à l'observation des objets éloignés. Elle comprend un *objectif* convergent, donnant une image réelle de l'objet dans son plan focal image, et un *oculaire* convergent faisant fonction de loupe et donnant une image virtuelle qui est vue par l'œil.

Il faut remarquer que, quand on observe un objet de diamètre apparent sensible (une planète ou un objet terrestre), l'image réelle fournie par l'objectif, dans le plan focal-image, est d'autant plus grande que la *distance focale* F de l'objectif est plus grande. De là, la longueur qu'on est conduit à donner aux lunettes astronomiques, longueur d'autant plus grande que l'instrument doit être plus grossissant. — D'autre part, quand la lunette est destinée à l'observation d'objets très peu lumineux, comme la plupart des étoiles, l'objectif doit avoir une *surface* aussi grande que possible, afin d'admettre la plus grande quantité possible de lumière, contribuant à la formation de l'image réelle. Or, une lentille ne peut avoir une grande surface qu'à la condition d'avoir de grands rayons de courbure et, par suite encore, une grande distance focale (88).

La figure 125 rend compte de la formation des images. Soient C l'objectif et C' l'oculaire; l'objet AB est supposé à gauche de C et très éloigné. L'image A_1B_1, réelle, renversée, et très petite, se forme dans le plan focal image de l'objectif; il suffit donc, pour l'obtenir, de tracer l'axe secondaire ACA_1. L'image aérienne réelle A_1B_1, que l'on regarde à travers l'oculaire C', doit se trouver placée entre la lentille C' et son foyer objet f_1, puisque cette lentille joue le rôle de loupe. L'oculaire C' substitue donc à l'image A_1B_1 une image virtuelle A'B', droite par rapport à A_1B_1, c'est-à-dire renversée par rapport à l'objet AB. — La figure 125 indique la marche d'un pinceau de rayons provenant du point A de l'objet.

L'impossibilité où l'on est de changer la distance de l'objet à l'in-

(*) Huygens (1627-1695), célèbre mathématicien et physicien hollandais, qui vécut à Paris de 1666 à 1681. Il est surtout connu par l'application qu'il fit du pendule aux horloges, et par de nombreux travaux d'optique.

strument, comme on le faisait pour le microscope, oblige à faire mouvoir l'oculaire par rapport à l'image fixe A_1B_1, pour réaliser la

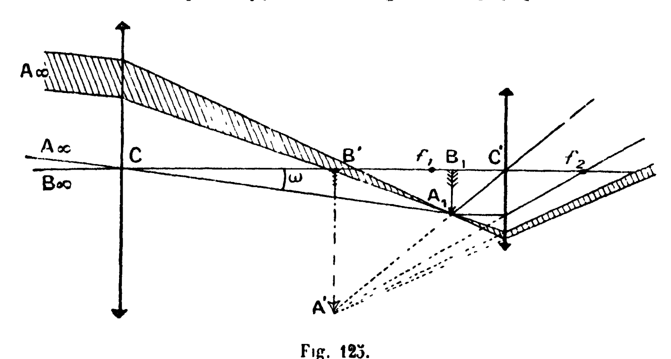


Fig. 125.

mise au point. — L'objectif est fixé en L (*fig.* 126), à l'extrémité d'un gros tube de métal, dans l'autre extrémité, s'engagent deux *tirages*, c'est-à-dire deux tubes de diamètres plus petits, dont le

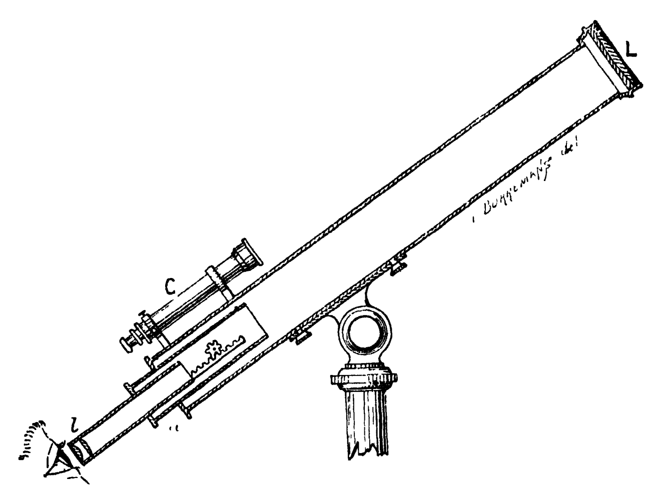


Fig. 126.

dernier porte l'oculaire *l*. Cet oculaire, comme dans le microscope, est toujours un *doublet*. Mais le doublet utilisé dans la lunette n'est pas constitué comme celui du microscope. La première len-

tille L_1 (*fig.* 127) laisse se former l'image A_1B_1 fournie par l'objectif, d'où le nom d'*oculaire positif* que l'on donne à ce doublet. La lentille L_1, de centre optique C_1, donne de l'image A_1B_1 une image virtuelle A_2B_2 dont la lentille L_2, de centre optique C_2, donne à son

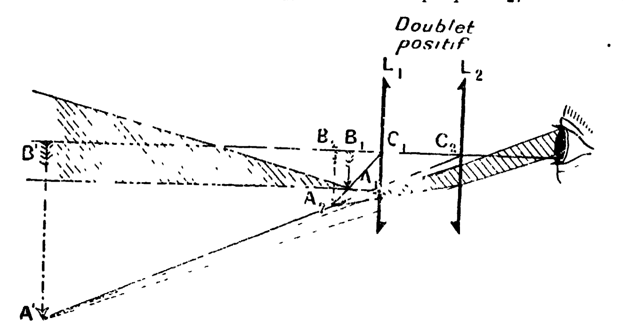


Fig 127.

tour l'image virtuelle définitive A'B'. Le doublet positif a été imaginé par Ramsden (1735-1800). De même que le doublet négatif (122), à égalité de puissance, il donne de meilleures images que l'oculaire simple de Képler.

Pour *mettre au point*, on commence par faire glisser le tube *a* dans le tube qui forme le corps de la lunette, jusqu'à ce que l'image apparaisse avec une certaine netteté; on achève ensuite la mise au point, en imprimant au tube porte oculaire de petits déplacements, au moyen d'une crémaillère et d'un pignon denté commandé par un bouton extérieur (*)

Les déplacements de l'oculaire, correspondant à la mise au point par une même vue d'objets situés à diverses distances, sont assez importants. Ainsi, par exemple, si $F = 1$ m, et si l'objet est à l'infini, on a (*fig* 125) $CB_1 = 100$ cm ; au contraire, si l'objet visé est à 50 m, on trouve que CB_1 est égal à 102 cm. Il faut donc ici un tirage de 2 cm pour passer de la visée d'un objet à l'infini à celle d'un objet à 50 m

Les déplacements de l'oculaire, correspondant à la mise au point d'un même objet par différentes vues, sont de l'ordre de grandeur de la latitude de mise au point de la loupe oculaire (112). D'après l'identité du sens des déplacements de l'objet et de l'image dans une lentille, il est aisé de voir

(*) La lunette et le microscope sont deux types extrêmes d'instruments, entre lesquels viennent prendre place toute une série d'instruments intermédiaires, utilisés dans les laboratoires de physique pour viser des objets situés à des distances plus ou moins grandes On donne à ces instruments, formés des mêmes éléments que la lunette, le nom de *viseurs*.

qu'un myope tend à raccourcir l'instrument, un hypermétrope à l'allonger : chaque observateur tend donc à modifier la longueur de l'instrument à l'image de sa propre vue.

124. *Grossissement d'une lunette.* — On appelle *grossissement* d'une lunette, le rapport du diamètre apparent de l'une des dimensions de l'image, vue dans l'instrument, au diamètre apparent de la dimension homologue de l'objet vu à l'œil nu. Mais ici, la distance de l'objet ne pouvant pas varier au gré de l'observateur, il est nécessaire de considérer le diamètre apparent de l'objet tel qu'il est vu, à l'œil nu, *dans sa position réelle*.

Soit P la puissance de l'oculaire et A_1B_1 la grandeur de l'image qu'il examine; l'angle sous lequel l'image définitive sera vue est donc $P.A_1B_1$. Or si l'on désigne par ω l'angle ACB (*fig.* 125) sous lequel l'objet est vu à l'œil nu, on a sensiblement $A_1B_1 = \omega.F$. Le grossissement G de la lunette est donc donné par l'expression :

$$G = \frac{P.\omega F}{\omega} = P.F;$$

le grossissement d'une lunette est égal au produit de la puissance de son oculaire par la longueur focale de son objectif. — Si f est la distance focale de l'oculaire, $P = \frac{1}{f}$, et le grossissement prend la forme remarquable

$$G = \frac{F}{f}.$$

Le grossissement est donc d'autant plus grand que F lui-même est plus grand par rapport à f. On peut déterminer le grossissement en mesurant séparément F et f (93).

125. *Réticule. — Axe optique.* — Dans les recherches astronomiques ou physiques, les lunettes servent surtout à déterminer la *direction* dans lesquelles se trouve un point par rapport à l'observateur, à un moment donné. Il est donc nécessaire de fixer, dans l'instrument lui-même, une *ligne de visée.* Pour cela, on place à l'intérieur du tube, dans le plan où se forme l'image *réelle* fournie par l'objectif, un *réticule* (*fig.* 128), c'est-à-dire un diaphragme présentant une ouverture circulaire dans laquelle sont tendus deux fils très fins, perpendiculaires entre eux : ce sont ordinairement des fils d'araignée. — Lorsqu'une lunette est munie d'un réticule, il faut, *pour la mise au point* : 1° que l'oculaire soit mobile par rapport au réticule, afin de permettre d'abord la mise au point du réticule pour les différentes vues; 2° que le réticule soit mobile par rapport à l'ob-

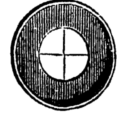


Fig. 128.

jectif, pour permettre ensuite la mise au point d'objets situés à différentes distances de l'instrument. Pour viser un point, on dirige l'instrument de façon que l'œil placé derrière l'oculaire voie l'image de ce point coïncider avec le point de croisement des fils . il ne peut en être ainsi que si le point visé est situé dans le prolongement de la droite qui passe par le point de croisement des fils et par le centre optique de l'objectif. Par suite. le point de croisement des fils détermine, avec le centre optique de l'objectif, une droite qui doit être considérée comme liée à la lunette elle-même, et qui sert à définir la ligne de visée : c'est cette droite qu'on nomme l'*axe optique*.

Des cercles gradués, sur lesquels se meuvent les lunettes, servent à mesurer les angles dont on doit déplacer leur axe optique pour passer de la visée d'un point à celle d'un autre.

126. ***Champ moyen de la lunette. — Cercle oculaire. — Chercheur.*** — Le champ d'un instrument d'optique, en général, est l'espace dans lequel doit être compris un point extérieur pour que son image soit visible dans l'instrument. Dans la lunette, les faisceaux lumineux qui proviennent de l'objectif sont très effilés à leur sommet. Cela tient ici à la grandeur de la distance focale de l'objectif, comparée à son rayon d'ouverture (la raison d'ouverture (73) des objectifs varie de 1/30 à 1/50). On peut donc réduire les cônes à leurs axes secondaires. Il en résulte que, pour qu'un point soit dans le champ de l'instrument, il suffit que son axe secondaire par rapport à l'objectif rencontre l'oculaire. Le champ ainsi défini est le *champ moyen*; il est déterminé par le cône ayant son

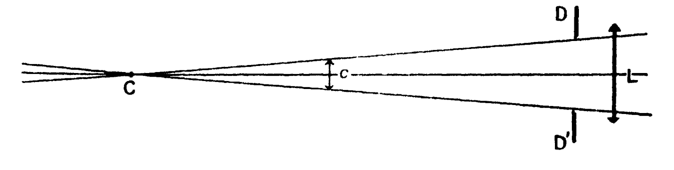


Fig 129.

sommet au centre optique C (*fig.* 129) de l'objectif et circonscrit à l'oculaire. — Pour bien le délimiter, c'est-à-dire pour supprimer la région qui se trouve en dehors du champ moyen, et qui ne serait pas suffisamment éclairée, on place dans le plan où se forme l'image réelle fournie par l'objectif, un *diaphragme* DD' percé d'une ouverture d'un diamètre égal, et même un peu inférieur, à celui de la section circulaire du cône de champ moyen par ce plan. En appelant r le rayon d'ouverture et w la raison d'ouverture de l'oculaire (73), et remarquant que la longueur de l'instrument est sen-

siblement la distance focale F de l'objectif, on a, pour la mesure de l'angle de champ,

$$c = \frac{2r}{F} = \frac{2wf}{F} = \frac{2w}{G}.$$

Le champ varie donc en raison inverse du grossissement.

Une question se pose maintenant. Où faut-il placer l'œil pour apercevoir tout le champ de l'instrument? Or, tous les rayons qui sortent de la lunette sont entrés par l'objectif; ils peuvent donc être considérés, pour l'oculaire, comme émis par les divers points de l'objectif, et, à leur sortie de l'appareil, ils vont passer à travers l'image de l'objectif fournie par l'oculaire. Cette image est un petit cercle, qu'on appelle le *cercle oculaire*, dont on peut montrer expérimentalement l'existence derrière l'oculaire, en éclairant fortement l'objectif.

Pour embrasser tout le champ de l'instrument, l'œil se placera naturellement de façon que la pupille soit au cercle oculaire.

Dans une lunette de fort grossissement, le champ est nécessairement très petit; de là, souvent, la nécessité d'un *chercheur*, que l'on fixe sur la lunette principale. Le chercheur est une petite lunette C (*fig.* 126), de grossissement faible, et par suite d'assez grand champ, dont l'axe optique est réglé parallèlement à l'axe optique de la lunette principale. Lorsqu'on a découvert, à l'aide du chercheur, le point que l'on se propose de viser, on amène son image au point de croisée des fils du réticule du chercheur : il se trouve alors dans le champ de la lunette principale, et l'on peut achever d'amener son image à se former exactement au point de croisée des fils du réticule de cette lunette.

127. ***Lunette terrestre.*** — Le renversement des images, qui n'a pas d'inconvénient dans les observations astronomiques ou physiques, serait peu commode pour l'observation des objets terrestres. On désigne sous le nom de *lunettes terrestres*, ou *longues-vues*, des lunettes qui diffèrent de la lunette ordinaire par l'interposition, en avant de l'oculaire, d'un système de lentilles ayant pour but de substituer, à l'image réelle et renversée qui est fournie par l'objectif, une autre image *redressée*, par rapport à laquelle l'oculaire fonctionne toujours comme une loupe. L'ensemble prend le nom d'*oculaire terrestre*. — L'oculaire terrestre le plus souvent employé se compose de quatre verres convergents : le premier C_1 (*fig.* 130) donne, de l'image $\alpha\beta$ fournie par l'objectif, une première image $\alpha_1\beta_1$, virtuelle et agrandie; le second C_2, de même distance focale que le premier, donne de l'image $\alpha_1\beta_1$ une image $\alpha_2\beta_2$ *redressée* et encore agrandie; le troisième C_3 empêche la formation de $\alpha_2\beta_2$, et lui substitue l'image réelle $\alpha_3\beta_3$ de même sens; enfin, le dernier C_4

donne de $\alpha_3\beta_3$ l'image définitive droite $\alpha'\beta'$, vue par l'œil. La figure 130 indique la marche d'un pinceau de rayons lumineux. Les deux derniers verres de l'oculaire terrestre constituent un *doublet négatif*

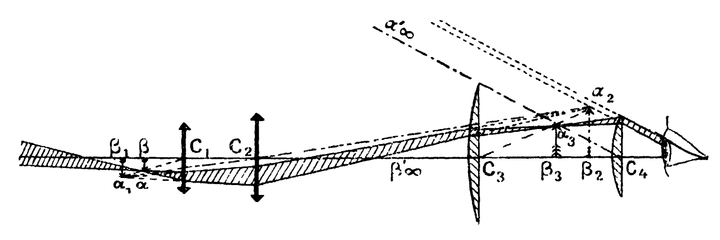


Fig. 130

d'Huygens (122); l'ensemble des deux premiers, qui a pour effet de redresser l'image, est appelé le *véhicule*. On peut donc considérer l'oculaire terrestre comme une sorte de microscope à oculaire négatif et dont le véhicule serait l'objectif. Il en résulte qu'en désignant par p la puissance de l'oculaire négatif C_3C_4, par γ le grandissement du véhicule C_1C_2, la puissance P de l'oculaire terrestre est (118) $P = p\gamma$, et le grossissement G de la lunette (124) $G = PF = p\gamma F$. Dans la combinaison ordinairement adoptée, $\alpha_2\beta_2 = 2\alpha\beta$, ou $\gamma \doteq 2$. On a donc $G = 2pF$, le grossissement est double de ce qu'il serait pour la même lunette sans le véhicule.

128. ***Lunette de Galilée.*** — La lunette de Galilée, dans laquelle l'oculaire est une lentille *divergente*, permet d'obtenir une image droite, sans interposition de verres supplémentaires, qui sont toujours une cause de perte de lumière, soit par absorption, soit en raison des réflexions partielles qui se produisent à chacune de leur surface.

La figure 131 indique la marche des rayons lumineux. Soit A_1B_1 l'image réelle et renversée que donnerait l'objectif C, en son foyer principal F_2 (B_1 et F_2 coïncident). Plaçons l'oculaire divergent *c entre cette image et l'objectif* C, de manière que sa distance cB_1 à l'image A_1B_1 soit à peine supérieure à sa distance focale cf_1, et cherchons ce que deviennent alors les rayons qui seraient venus concourir en A_1. Considérons en particulier un rayon qui, passant par le point A_1, tomberait sur l'oculaire parallèlement à l'axe principal : en traversant l'oculaire divergent, ce rayon serait réfracté de manière que son prolongement géométrique vînt passer par le foyer principal virtuel situé en f_2, devant la lentille (79) : il rencontre en A' l'axe secondaire A_1cA'; c'est donc en A' que passent les prolongements de tous les rayons qui, sans l'interposition de l'oculaire, viendraient

se croiser en A_1. L'image définitive de l'objet AB est donc A'B'. — De là résulte que l'œil, placé derrière l'oculaire, voit en A'B' une

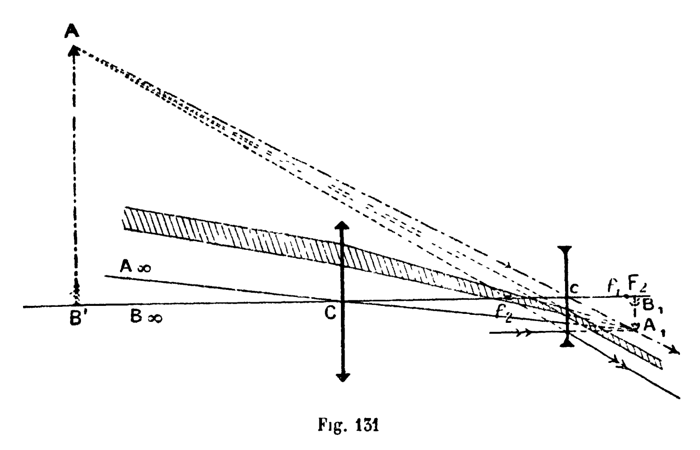


Fig. 131

image virtuelle, agrandie et renversée par rapport à A_1B_1, c'est-à-dire *droite* par rapport à l'objet AB lui-même (*).

129. ***Grossissement.*** — La valeur limite du grossissement dans la lunette de Galilée, défini comme dans la lunette astronomique, est toujours le produit de la puissance de l'oculaire par la distance focale de l'objectif (124), $G = P \times F = \frac{F}{f}$. Il est facile de le voir directement; en effet, supposons l'œil placé sensiblement au centre optique c de l'oculaire (*fig.* 131); la mesure de l'angle $A'cB'$ est $\frac{A'B'}{cB'}$ ou $\frac{A_1B_1}{cB_1}$, ou enfin sensiblement $\frac{A_1B_1}{f}$; de même la mesure de l'angle ACB est $\frac{A_1B_1}{F}$; par suite, $G = \frac{F}{f}$. Ce grossissement peut se mesurer en regardant, par exemple, les barreaux d'une grille, d'un œil à travers la lunette, et de l'autre œil directement. On voit combien de fois l'intervalle de deux barreaux est grossi par la lunette. Le grossissement varie de 2 à 3 dans les jumelles de théâtre; de 3 à 10 dans les jumelles de campagne.

(*) Dans la lunette de Galilée, le cercle oculaire (126) est virtuel; il n'existe donc pas, comme dans la lunette astronomique, une position de l'œil permettant de recevoir tous les rayons transmis par l'instrument. Mais on a intérêt à placer l'œil *le plus près possible de l'oculaire*, afin de recevoir le plus grand nombre possible des rayons divergents qui en sortent; le champ varie avec la position de la pupille derrière l'oculaire. — On ne peut pas non plus mettre de réticule, dans la lunette de Galilée.

Les jumelles (*fig.* 132) se composent de deux lunettes de Galilée, assujetties parallèlement, afin d'utiliser la vision avec les deux yeux.

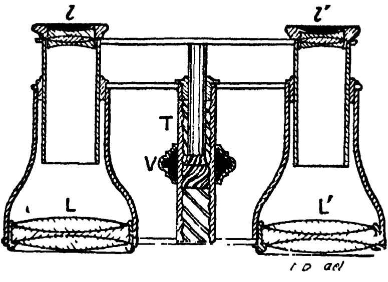


Fig. 132.

Les tubes qui portent les objectifs L, L' sont réunis par des traverses, à leurs deux extrémités. Les tubes à tirage, qui portent les oculaires *l*, *l'*, sont réunis également par une traverse, de manière qu'on puisse faire mouvoir ensemble ces deux tubes à tirage, et les mettre simultanément *au point* pour les deux yeux. Il suffit, pour cela, de faire tourner sur lui-même le tube T. au moyen de la molette saillante V que l'on tient entre les doigts : le pas de vis pratiqué intérieurement sur la paroi de ce tube fait alors mouvoir les oculaires dans un sens ou dans l'autre.

CHAPITRE VI

PHOTOGRAPHIE

---

130. ***Photographie. — Rayons actifs.*** — On désigne sous le nom général de *photographie* l'art de fixer les images lumineuses sur l'écran qui les reçoit, en utilisant l'action chimique de la lumière sur les sels d'argent, qui sont ainsi décomposés, et ramenés à un état métallique noir pulvérulent.

Les différentes parties du spectre de la lumière blanche (59) ne sont pas également actives à cet égard. Prenons, par exemple, un papier qui a été successivement imprégné dans l'obscurité, d'une

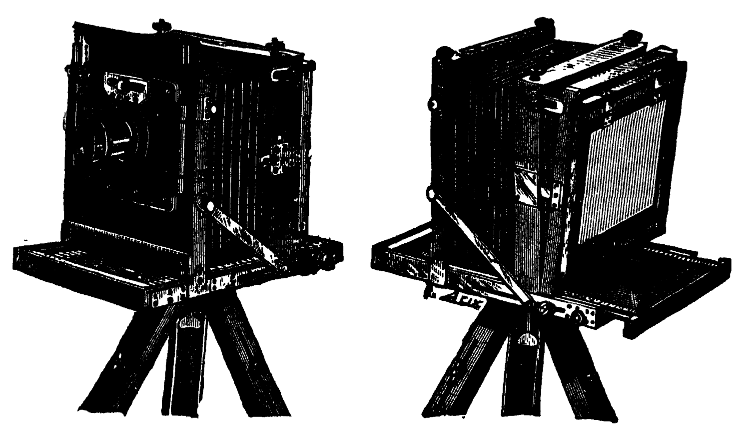


Fig 133

couche de chlorure ou mieux de bromure alcalin, puis d'une couche d'azotate d'argent, en faisant sécher après l'application de chaque couche. Ce papier renferme donc une pellicule de bromure d'argent qui n'a pas encore vu la lumière. Si l'on expose cette pellicule dans la chambre noire à l'action du spectre solaire, l'expérience montre

que le bromure d'argent noircit, à partir du bleu jusqu'au violet, et même au delà du violet (*). Au point de vue photographique, les radiations actives de la lumière blanche sont donc les radiations les plus déviables du spectre, y compris les radiations ultra-violettes.

131. *Chambre noire.* — L'appareil qui sert à produire l'image à photographier est une *chambre noire*, plus ou moins semblable à celle que représente la figure 133 : c'est une caisse rectangulaire, formée de deux parties réunies entre elles par un tirage à soufflet. A la face antérieure est fixé le tube qui porte l'objectif; dans la face postérieure est enchâssée une glace dépolie, sur laquelle viennent se peindre les images renversées des objets placés en face de l'objectif. — Pour amener la glace dans le plan conjugué de l'objet par rapport à la lentille, le photographe se place derrière cette glace, et la fait avancer ou reculer jusqu'à ce que l'image paraisse nette; il achève de *mettre au point*, en imprimant à la glace dépolie de petits déplacements à l'aide d'une crémaillère et d'un pignon denté.

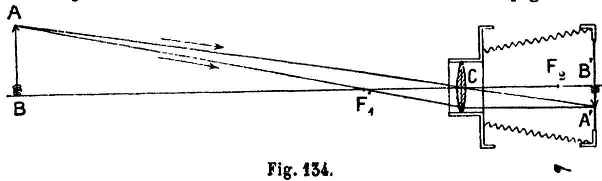


Fig. 134.

La marche des rayons lumineux est indiquée dans la figure schématique 134 : l'objet lumineux AB est toujours placé à une distance très supérieure au double de la distance focale principale f de l'objectif, de centre optique C; l'image A'B' renversée, plus petite que l'objet, se fait alors un peu en arrière du foyer-image F_2.

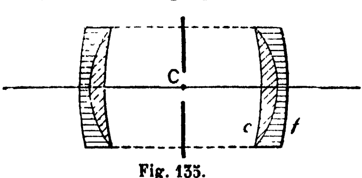


Fig. 135.

Les objectifs photographiques sont toujours formés de combinaisons plus ou moins complexes, qui ont pour but de réaliser de bonnes images, nettes, semblables à l'objet, et ne présentant pas d'irisations. Pour cela, l'objectif est généralement formé de deux lentilles identiques (*fig.* 135); chaque lentille est formée d'un ménisque convergent en crown *c* et d'un ménisque

(*) L'étude de la dispersion (Classes de Mathématiques A et B) montre que dans le spectre de la lumière blanche, il existe des rayons plus déviés que le violet par l'action du prisme (59), et auxquels on a donné le nom de rayons ultra-violets; notre rétine n'est pas sensible à ces rayons; nous ne les voyons pas; mais ils impressionnent la plaque photographique, et la photographie est même le moyen le plus simple de montrer leur existence, et d'étudier leurs propriétés.

divergent en flint *f*. Le diaphragme destiné à limiter l'ouverture des lentilles, afin d'avoir plus de netteté dans les images, est logé dans le plan de symétrie C du système, ce qui empêche, en outre, la déformation des images d'une façon plus complète. Après avoir fait la mise au point sur la plaque de verre dépoli, on bouche l'objectif, on remplace le verre dépoli par un châssis fermé contenant la plaque sensible, dont la face antérieure devra prendre exactement la place de la face antérieure dépolie de la plaque de verre; enfin, on démasque plus ou moins longtemps l'objectif. Des obturateurs mécaniques permettent de réaliser des temps de pose extrêmement courts.

Dans les appareils à main, on supprime la glace dépolie; la plaque sensible occupe la position du plan focal-image de l'objectif, de sorte que tous les objets situés au delà d'une certaine distance sont au point. — L'appareil renferme généralement un certain nombre de plaques, que l'on substitue les unes aux autres par un mécanisme convenable.

132. ***Plaques ou pellicules sensibles, au gélatino-bromure d'argent. — Épreuves négatives ou clichés.*** — Aujourd'hui, la seule préparation sensible employée est une émulsion de bromure d'argent dans la gélatine, qu'on appelle le *gélatino-bromure d'argent*, et qui permet de diminuer le temps de pose, jusqu'à donner des images presque *instantanées*. — La couche sensible est déposée, soit sur une plaque de verre, soit sur une pellicule mince de celluloïd : on a, dans ce dernier cas, l'avantage de pouvoir facilement transporter, en voyage, un très grand nombre de ces pellicules. — Après que la plaque sensible a été exposée à l'action de l'image photographique dans la chambre noire, on la transporte, toujours à l'abri de la lumière, dans un laboratoire noir où l'on s'éclairera avec une lanterne bien close, dont une des parois sera constituée par un verre rouge, étudié au spectroscope, et ne laissant absolument passer que des radiations rouges auxquelles les plaques ordinaires au gélatino-bromure sont extrêmement peu sensibles. — L'image n'est encore sur la plaque qu'à l'état *latent*; elle n'est pas visible à l'œil. Il faut, pour la faire apparaître, c'est-à-dire pour la *développer*, la plonger pendant un certain temps dans un développateur, qui ne fera que continuer l'action réductrice de la lumière. On arrête le développement lorsque l'image a l'intensité et les détails voulus. Les développateurs les plus employés sont : l'*oxalate ferreux* (sulfate ferreux et oxalate neutre de potassium), le *pyrogallol* (pyrogallol, sulfite de sodium et carbonate de sodium), l'*hydroquinone* (additionné de carbonate et de sulfite de sodium), le *diamidophénol* (à l'état de chlorhydrate mélangé de sulfite de sodium), etc. — On procède ensuite au *fixage*, qui a pour but de dissoudre le bromure d'argent non réduit. On emploie pour cela

une solution d'hyposulfite de sodium à 20 pour 100; on lave ensuite à l'eau pure et on laisse sécher (*).

L'épreuve obtenue, ou *cliché*, constitue une image inverse, ou *négative*, puisque, sur les parties de la plaque qui ont été éclairées, la réduction des sels d'argent a donné naissance à un dépôt d'argent noir pulvérulent, tandis que les parties non éclairées ont repris leur transparence après le fixage. — Il nous reste à indiquer comment ce *cliché négatif* peut servir à tirer des *épreuves positives.*

133. ***Épreuves positives aux sels d'argent.*** — Le procédé consiste à exposer à la lumière, derrière le cliché et en contact avec lui, dans un châssis-presse, une feuille de papier, *sensibilisée* au chlorure ou au citrate d'argent. Les rayons lumineux, passant à travers les parties transparentes du cliché, rougissent la couche sensible du papier, dans les parties correspondantes : les parties noires du cliché, en arrêtant la lumière, conservent au papier sa blancheur, dans les points qui leur correspondent. On obtient donc sur le papier une image *positive*, et cette opération peut être répétée indéfiniment, puisqu'elle n'a fait subir au cliché aucune altération.

Après avoir retiré du châssis cette épreuve positive lorsque sa teinte rouge paraît suffisante, on fait *virer* la teinte au noir dans une solution de chlorure d'or, dont le métal remplace l'argent, et on la *fixe* à l'hyposulfite de sodium, qui dissout les sels non attaqués par la lumière. — Enfin, on lave l'épreuve, pendant plusieurs heures, avec de l'eau fréquemment renouvelée.

Si l'on emploie du papier au gélatino-bromure d'argent, la durée d'exposition à la lumière doit être très courte, et l'on développe et fixe cette image positive sur papier comme une plaque sensible.

134. ***Épreuves au charbon.*** — Quels que soient les perfectionnements apportés à la préparation des épreuves aux sels d'argent, il paraît à peu près impossible de leur assurer une conservation indéfinie. On a cherché un procédé permettant de tirer des épreuves au charbon, douées d'une inaltérabilité absolue.

Pour le tirage des épreuves dites *au charbon*, on expose à la lumière, derrière le cliché, une feuille de papier couverte d'une couche de gélatine, imprégnée de bichromate de potassium, mélangé avec du charbon réduit en poudre impalpable. — La gélatine bichromatée et sèche acquiert, sous l'influence de la lumière, la propriété d'être plus ou moins *insoluble* dans l'eau chaude, selon

(*) Voici une formule de bain de développement à l'hydroquinone.

Eau distillée.	1000	grammes.
Sulfite de sodium anhydre	150	—
Hydroquinone	7,5	—
Carbonate de potassium.	40	—
Métol	5	—

que l'action des rayons lumineux a été plus ou moins intense. Il suffira donc de plonger la feuille de papier dans un bain d'eau à une température convenable : c'est seulement aux points du papier qui auront été préservés de l'action de la lumière par les parties noires du cliché, que la gélatine se dissoudra, en entraînant avec elle le charbon qui y avait été incorporé.

135. ***Procédés photomécaniques.*** — Lorsqu'il s'agit de reproduire une image photographique à un grand nombre d'exemplaires, on abandonne les méthodes précédentes, et on utilise certains procédés mécaniques, qui sont devenus d'une exécution courante dans l'industrie. Tous ces procédés ont pour point de départ l'action de la lumière sur la gélatine bichromatée.

L'un de ces procédés, la *photogravure*, est fondé sur cette remarque que la couche de gélatine bichromatée, qui contient l'image obtenue comme il a été dit plus haut, à propos du tirage des épreuves positives au charbon (134), présente, après le lavage, des *épaisseurs variables* en ses différents points, d'autant plus grandes que la lumière a agi davantage. Or, si l'on prépare, avec toutes les précautions convenables, une feuille de gélatine portant ainsi l'image en relief, il suffit de la comprimer fortement contre une plaque de plomb (ou d'un alliage de plomb et d'antimoine), pour qu'elle pénètre dans le métal et donne un moule en creux, d'une grande finesse.

Mais, comme la feuille de plomb n'offrirait pas une dureté suffisante pour résister à l'action de la presse qui doit servir au tirage, on en fait un moulage et un contre-moulage en cuivre, par la galvanoplastie (373) : c'est la planche de cuivre ainsi obtenue qui sert au tirage à l'encre grasse.

Dans la *photocollographie* (anciennement *phototypie*), on utilise directement la plaque de gélatine bichromatée, sensibilisée par la lumière. Lorsqu'on mouille *légèrement* cette gélatine, l'eau pénètre et gonfle les parties qui ont été préservées de l'action de la lumière, et laisse sèches les parties qui ont été éclairées. Si, maintenant, on passe sur la surface un rouleau chargé d'encre lithographique, ou *encre grasse*, l'encre prend exclusivement sur les parties restées sèches. — Une couche de gélatine bichromatée, déposée sur une pierre bien lisse, et soumise aux opérations que nous venons de décrire, présente donc les propriétés d'une surface lithographique, au moyen de laquelle on pourra tirer des épreuves à l'encre grasse, avec une presse semblable à la presse lithographique.

Tous ces procédés fournissent des épreuves à modelé continu, et ne s'emploient que dans les tirages hors texte. La *phototypogravure* ou *similigravure*, au contraire, donne des images formées de points et de traits discontinus, plus ou moins rapprochés suivant l'inten-

sité des tons à obtenir, exactement comme dans les procédés typographiques ordinaires, ce qui permet un tirage direct dans le texte. Pour obtenir ce résultat, on reproduit l'épreuve photographique au format voulu, en plaçant devant la plaque sensible un réseau appelé *trame*, formé de deux glaces gravées de traits opaques équidistants, et appliquées l'une contre l'autre de manière que ces traits, superposés perpendiculairement les uns aux autres, forment un quadrillage régulier plus ou moins fin. On met la trame dans la chambre noire photographique, à une distance convenable de la plaque sensible. Les lignes opaques du réseau portent ombre et pénombre sur la plaque, pendant que les mailles très fines, jouant le rôle des petites ouvertures d'une chambre obscure (6), donnent des images du trou du diaphragme, de formes variables suivant la forme et l'orientation de celui-ci. Le négatif ainsi obtenu n'est donc pas simplement le négatif du dessin à photograver, c'est aussi celui de la trame, et si l'on en prend un positif, ce sera à la fois un positif du dessin et de la trame.



Fig. 136.

D'ailleurs, le dessin, qui a éclairé la trame, n'a pas été sans réagir sur elle : dans les *blancs* du dessin, par suite d'une irradiation des particules lumineuses vers les particules voisines de la plaque sensible, les points blancs ont envahi l'ombre et la pénombre, et l'aspect du positif est celui d'une série de points noirs sur un fond blanc; dans les *noirs*, au contraire, l'aspect est celui d'une série de points blancs, isolés sur un fond noir. Ce sont ces combinaisons qui donnent leurs valeurs aux différents tons, et c'est ce qu'on voit nettement à la loupe sur la figure 136 qui est la reproduction d'un tableau du Louvre obtenue de cette façon. Mais cet aspect discontinu échappe à l'œil le mieux prévenu et la continuité optique semble parfaite (*).

(*) Pour le tirage typographique des épreuves, on prépare un *cliché sur zinc*. La plaque sensible avait été formée d'une pellicule de collodion imprégnée d'un sel d'argent. On détache cette pellicule de sa plaque de verre, et on l'applique sur une plaque de zinc, recouverte de bitume de Judée ; cette substance a, comme la gélatine bichromatée, la propriété de devenir insoluble dans son dissolvant, l'essence de térébenthine, lorsqu'elle a été insolée. On expose donc à la lumière sous le négatif, on trempe dans l'essence de térébenthine; le bitume se dissout aux endroits préservés de l'insolation, et on attaque la plaque en ces endroits par de l'acide azotique dilué. On obtient ainsi une plaque de zinc portant en relief les parties qui devront prendre l'encre typographique, et en creux les parties que l'encre n'aura pas à toucher, tout comme dans les caractères d'imprimerie.

136. ***Projections photographiques.*** — La photographie est devenue depuis quelques années l'auxiliaire indispensable du professeur, et les projections photographiques jouent actuellement un rôle considérable dans l'enseignement.

Pour obtenir des photographies bien transparentes (ou *diapositifs*) pour la projection, on emploie des plaques au chlorure ou au lactate d'argent.

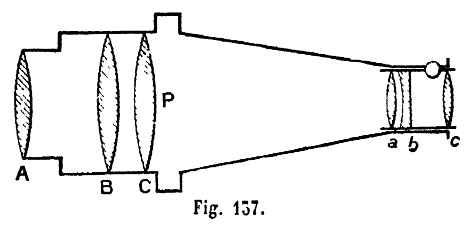


Fig. 137.

Un objectif à projection se compose de deux parties : 1° le *condenseur de lumière*, formé de deux ou plusieurs lentilles convergentes A,B,C (*fig.* 137), destinées à condenser la lumière électrique ou la lumière oxhydrique sur la photographie que l'on place en P, immédiatement derrière ; 2° l'*objectif* proprement dit, composé également de plusieurs lentilles *a*, *b*, *c*, destinées à fournir sur un écran une image nette et agrandie de la photographie. La mise au point s'effectue en déplaçant le système *a*, *b*, *c*, au moyen d'un bouton à crémaillère.

LIVRE QUATRIÈME

ÉLECTRICITÉ ET MAGNÉTISME

CHAPITRE PREMIER

ÉLECTRICITÉ STATIQUE

I. — Phénomènes fondamentaux.

137. ***Électrisation par frottement.*** — Certaines substances, l'ambre jaune, le verre, l'ébonite (*), la paraffine, etc., frottées avec une étoffe de laine, acquièrent la propriété d'attirer les corps légers, tels que des fragments de papier, de la râpure de liège, des feuilles d'or ou d'aluminium battu. Il est particulièrement commode d'employer, comme corps léger, une petite balle de moelle de sureau, A (*fig.* 138), suspendue à un fil tres fin, de lin ou de coton, qui est lui-même porté par une potence métallique BC ; si l'on approche de la balle de sureau un bâton de verre frotté, il se manifeste une vive attraction. Les corps qui ont acquis cette propriété d'attirer les corps légers sont dits *électrisés*, et l'on a donné le nom d'*électricité* (*) à la cause, de nature inconnue, qui modifie ainsi leurs propriétés.

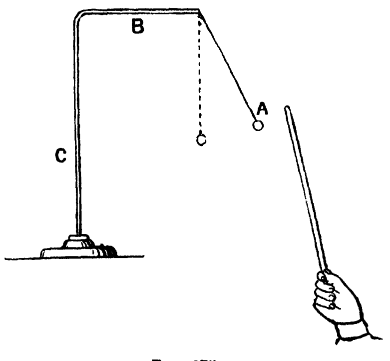


Fig. 138.

(*) L'ébonite s'obtient en incorporant à du caoutchouc environ le quart de son poids de soufre.

138. *Corps bons conducteurs et corps mauvais conducteurs.* — Si l'on essaie d'*électriser*, de cette façon, un corps métallique tenu à la main, une sphère de cuivre, par exemple, on n'y réussit pas; mais si l'on supporte la sphère par une tige d'ébonite, ou de verre bien sec, B (*fig.* 139), et qu'on la frappe avec de la laine, ou avec une peau de chat légèrement chauffée et sèche, elle s'électrise sans difficulté et attire la balle de sureau.

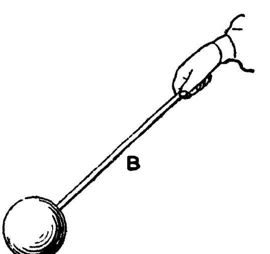


Fig. 139.

Une expérience simple va nous permettre d'expliquer cette différence entre le verre ou l'ébonite, et les métaux. Électrisons une baguette de verre en la frottant seulement à une de ses extrémités : l'*électrisation*, mise en évidence par l'attraction des corps légers, est localisée aux points frottés; si l'on électrise de même un cylindre métallique porté par un pied de verre *bien sec* (*fig.* 140), en le frappant légèrement à un bout avec une peau de chat, il agit sur la balle de sureau aussi bien par l'extrémité non frottée que par l'autre. On dit, pour exprimer ce fait, que les métaux sont *bons conducteurs* de l'électricité (*); développée en un de leurs points, l'électricité se répand d'elle-même dans toute leur étendue. Sur les corps tels que le verre, l'ébonite, l'électricité reste localisée aux points où elle a été produite; ces corps sont dits *mauvais conducteurs* de l'électricité.

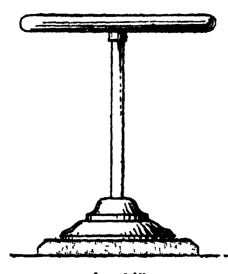


Fig. 140.

En y regardant d'un peu plus près, on reconnaît d'ailleurs qu'il n'existe ni bons ni mauvais conducteurs, au sens absolu du mot; les corps sont plus ou moins conducteurs; l'électricité produite en un point se répand sur le corps avec une certaine vitesse : vitesse très faible pour le verre, la paraffine (une fraction de millimètre par heure), vitesse bien plus grande pour certaines substances, telles qu'un fil de coton ciré (quelques millimètres par seconde); enfin vitesse extrêmement grande pour les métaux (comparable, par exemple, à la vitesse de propagation de la lumière).

La catégorie des corps bons conducteurs comprend les métaux,

(*) L'électrisation par frottement fut observée pour la première fois sur l'ambre jaune (en grec *électron* d'où *électricité*), par Thalès de Milet, philosophe grec du VIIe siècle avant J.-C.

le sol, le corps de l'homme et des animaux, le bois, surtout quand il est humide, les fils de lin, la paille, le charbon ; au contraire, le verre, la porcelaine, la résine, l'ébonite, la paraffine, le soufre, la gomme-laque, la soie, le coton, sont des corps mauvais ou médiocres conducteurs.

139. *Électrisation par contact.* — L'électricité peut aussi passer sur un corps, par simple contact avec un autre corps déjà électrisé ; ce procédé d'électrisation est surtout commode quand les deux corps sont conducteurs. Dans ce cas, le passage de l'électricité d'un corps sur l'autre est souvent accompagné d'une *étincelle*, c'est-à-dire d'un trait de feu qui jaillit entre les deux corps, un peu avant que le contact se produise.

140. *Isolants.* — On voit maintenant pourquoi l'électrisation par frottement d'un corps métallique tenu à la main n'est pas possible; le corps de l'opérateur et le sol étant bons conducteurs, l'électricité se répand dans le sol, et il n'en reste qu'une quantité insensible sur le corps métallique frotté. — Par suite, pour conserver l'électrisation d'un conducteur, il faudra interposer, entre ce conducteur et le sol, un support mauvais conducteur, l'*isoler* du sol : de là le nom d'*isolants* que l'on donne souvent aux corps mauvais conducteurs. Les isolants les plus employés sont le verre, l'ébonite, la paraffine, les fils de soie (*).

Il est bien évident que l'air est un isolant parfait ; sinon, nous ne pourrions conserver d'électricité sur aucun corps conducteur ; on a reconnu également que tous les gaz sont isolants, y compris même la vapeur d'eau. — Le vide parfait est le meilleur isolant. — Divers liquides, le pétrole, l'essence de térébenthine, la benzine, sont également de très bons isolants; les solutions acides ou salines sont, au contraire, des liquides conducteurs.

141. *Attractions et répulsions électriques. — Deux espèces d'électricité.* — Pour étudier les propriétés des corps électrisés, il est commode d'employer le *pendule électrique isolé* (*fig.* 141); c'est une petite balle conductrice de moelle de sureau A, suspendue à un fil de soie isolant F (fil de cocon); pour avoir un isolement parfait de A, on fixe le fil à un petit bloc de paraffine C, porté par un

(*) Le verre est un excellent isolant quand il est sec et que sa surface est parfaitement propre; mais la moindre trace d'humidité déposée à sa surface suffit pour en faire un isolant très médiocre; verni à la gomme-laque, il est moins sensible à l'humidité.

La paraffine est un isolant presque parfait, à condition de mettre sa surface à l'abri des poussières; elle manque toutefois de solidité; en lui incorporant, à chaud, un peu de soufre, on n'altère pas son pouvoir isolant et on lui communique de la résistance.

L'ébonite isole aussi très bien; mais, à la longue, sa surface s'altère, devient acide; elle doit être lavée de temps en temps avec une solution très étendue de soude, puis rincée soigneusement à l'eau pure.

support quelconque BB′ (*). — Si, après avoir frotté avec de la laine un bâton de verre poli, on l'approche de la balle de sureau A d'un pendule, elle se précipite contre le bâton de verre; après un instant de contact, la balle, ayant pris au verre une partie de son électricité, est vivement *repoussée* (**) (*fig.* 142, I). De même, si l'on frotte un bâton d'ébonite avec une étoffe de laine ou avec une peau de chat, et qu'on l'approche de la balle A′ d'un autre pendule, la balle est d'abord attirée jusqu'au contact, puis repoussée par l'ébonite. — En plaçant le bâton de verre électrisé entre A et A′, il repousse bien A, mais attire vivement A′ (*fig.* 142, I), inversement, le bâton d'ébonite qui repousse A′, attire A (*fig.* 142, II)

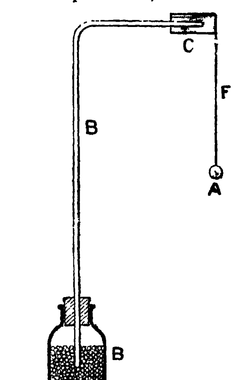


Fig. 141.

Dans cette expérience, le verre électrisé est dans un état différent de celui de l'ébonite, puisque leurs effets sur un même pendule sont opposés ; l'électricité du verre et celle de l'ébonite sont donc d'espèces différentes. On peut constater d'ailleurs que, si l'on prend un corps quelconque électrisé par frottement ou par contact, il se comporte à l'égard des pendules A et A′ soit comme l'ébonite, soit comme le verre.

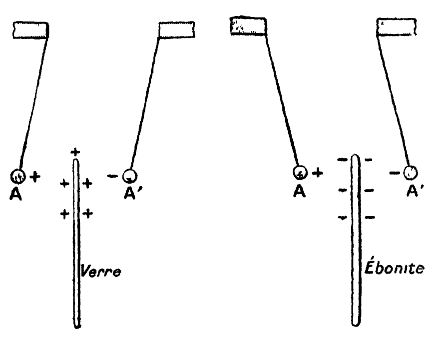


Fig. 142.

De ces expériences, on peut tirer les conclusions suivantes :

1° *Il y a deux espèces d'électricité, et deux seulement ;*

2° *Deux corps chargés de la même électricité se repoussent ;*

3° *Deux corps chargés d'électricité différente s'attirent.*

(*) Dans la figure 141, le support du pendule est formé d'une baguette de verre B fixée dans le goulot d'un flacon B′ rempli de grenaille de plomb pour lui donner de la stabilité.

(**) Cette expérience peut se faire sous une autre forme (Otto de Guéricke) : avec une baguette de verre électrisée, on électrise par contact un fragment de duvet, ou mieux un fragment de feuille d'or ou d'aluminium battu, qui est ensuite vivement repoussé ; on peut alors promener le corps léger tout autour de la salle, simplement en faisant agir sur lui la répulsion de la baguette de verre

Pour distinguer ces deux espèces d'électricité, nous appellerons *électricité vitrée ou positive*, et nous figurerons par des signes + celle qui se développe sur le verre poli frotté avec de la laine ; et *électricité résineuse ou négative* celle qui se développe sur l'ébonite également frottée avec de la laine (*) ; elle sera figurée par des signes —.

142. *Électroscope à feuilles d'or.* — Si l'on approche un corps de la balle A d'un pendule électrique, et qu'une attraction se produise, on en conclut que ce corps est électrisé : tout appareil permettant de constater qu'un corps est électrisé s'appelle un *électroscope*.

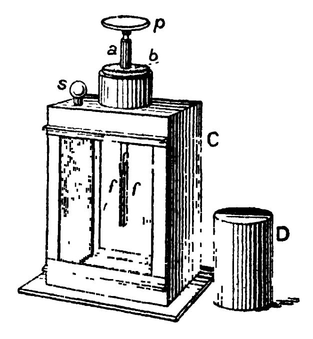


Fig. 143.

On a imaginé des électroscopes plus sensibles que le pendule électrique ; l'un des plus simples est l'*électroscope à feuilles d'or*. Il se compose essentiellement d'une tige de cuivre *a* (*fig.* 143), portant à son extrémité inférieure deux petites feuilles d'or *f*, *f*, de 3 à 4 centimètres de long et d'environ 3 millimètres de large ; l'extrémité supérieure de la tige porte un petit plateau *p* également en cuivre ; ce plateau est souvent remplacé par une petite boule *s* que l'on a figurée à part, sur la cage. La tige est fixée dans un bouchon de paraffine *b*, qui ferme une ouverture pratiquée dans le couvercle d'une cage métallique C. L'un des effets de cette cage est de protéger, contre l'agitation de l'air, les feuilles d'or, qui sont d'une extrême fragilité. Une fenêtre, ménagée dans la paroi antérieure de la cage, et fermée par une glace de verre, permet d'observer les feuilles d'or soit directement soit en projection. Un couvercle métallique D peut servir à protéger la partie de l'électroscope extérieure à la cage.

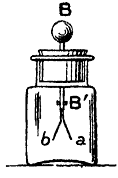


Fig. 144.

Quand l'électroscope n'est pas destiné à des expériences précises, on ajuste simplement le bouchon de paraffine dans le goulot d'un flacon de verre (*fig.* 144) ; les feuilles d'or sont ainsi bien protégées. Il est bon, dans ce cas, que le verre du flacon soit toujours un peu humide, pour qu'il soit conducteur de l'électricité.

(*) Rien ne permet, *a priori*, de dire si un corps frotté s'électrise positivement, ou négativement ; l'expérience seule peut renseigner sur ce point ; l'électricité développée dépend non seulement de la nature, mais de l'état des surfaces frottantes et de leur température. Ainsi, le verre frotté avec de la soie est négatif ; le verre poli ne s'électrise pas comme le même verre dépoli ; si l'on frotte deux morceaux du même verre l'un contre l'autre, le plus chaud devient négatif.

Nous expliquerons plus loin le fonctionnement de cet appareil ; bornons-nous à dire, pour le moment, que si l'on fait communiquer le plateau avec un conducteur électrisé, l'électroscope s'électrise et les feuilles d'or, chargées d'une même électricité, se repoussent et divergent plus ou moins (*fig.* 145, I). Si l'on touche le plateau avec le doigt, les feuilles d'or retombent dans la position verticale (*fig.* 145, II). — On constate également que le simple fait d'approcher du plateau un corps électrisé suffit pour produire une divergence des feuilles, divergence qui cesse d'ailleurs d'elle-même quand on éloigne le corps électrisé.

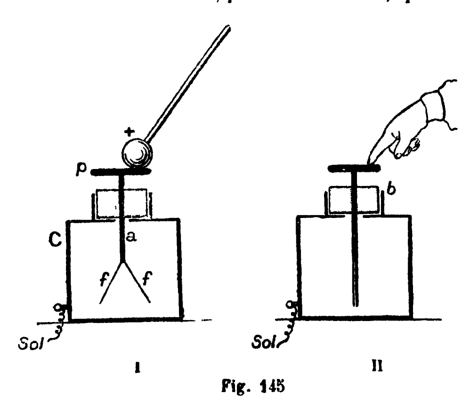


Fig. 145

Ce petit appareil est très sensible, et permet de mettre en évidence des charges électriques qui agiraient à peine sur un pendule.

Pour montrer, par exemple, l'électrisation d'un métal par frottement, il suffit de passer légèrement une étoffe de laine sur le plateau de l'électroscope : les feuilles divergent immédiatement.

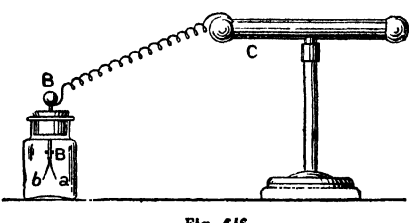


Fig. 146.

L'électroscope à feuilles d'or est aussi très commode pour mettre en évidence la plus ou moins grande conductibilité des corps. Si l'on joint par un fil de cuivre le plateau de l'électroscope à un conducteur isolé C (*), puis qu'on frappe légèrement ce conducteur avec une peau de chat, on voit *immédiatement* les feuilles d'or diverger (*fig.* 146), même si le

(*) L'isolement des sphères ou des cylindres de cuivre que l'on trouve habituellement dans les collections, est réalisé par des pieds de verre et laisse souvent à désirer. On s'affranchit de ce défaut en les posant sur une plaque de paraffine *à l'état neutre*. La paraffine est un excellent isolant, dont le défaut est de conserver trop longtemps l'électrisation qui s'y est développée accidentellement. Pour ramener la plaque à l'état neutre, il suffit de la flamber dans la flamme d'une lampe à alcool ou d'un bec Bunsen.

fil de cuivre est très long. — Si l'on substitue au fil de cuivre un fil de coton ciré, la divergence des feuilles ne commence qu'au bout de quelques instants, et augmente ensuite progressivement. — Avec un fil de soie bien sec, les feuilles ne divergeraient pas, même après plusieurs heures.

143. ***L'électrisation d'un conducteur en équilibre électrique est purement superficielle. — L'action de cette couche superficielle est nulle sur tout point intérieur au conducteur.*** — Cette propriété tres importante des conducteurs électrisés a été établie par Coulomb (*) ; on peut la montrer par les expériences suivantes :

1° *Expérience du conducteur creux.* — Un vase métallique A (*fig.* 147), de forme cylindrique, peut se fermer par un couvercle *b* auquel une boule de cuivre B est suspendue par un fil de soie. On électrise le cylindre, isolé sur une plaque de paraffine, et l'on constate avec l'électroscope que, si l'on touche la surface extérieure de A avec la boule B, portée par un crochet isolant *b*, elle s'électrise par contact. Si l'on introduit B dans le vase, comme l'indique la figure, et qu'on fasse basculer légèrement le support, on entend la boule B choquer la paroi intérieure du vase; au moyen du crochet isolant, on retire la boule, on décharge le couvercle en le touchant avec le doigt, et l'on constate, à l'électroscope, que B ne présente pas trace d'électricité.

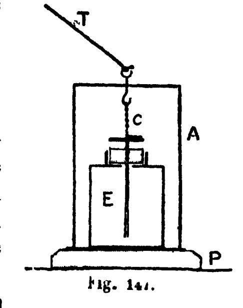


Fig. 147.

2° *Hémisphères de Cavendish* (**). — Une sphère métallique S (*fig.* 148) supportée par un fil de soie, peut être entièrement enveloppée par deux hémisphères H et H' également métalliques, munis de manches isolants, et qui forment une sphère plus grande. Si l'on électrise S et qu'on l'enveloppe complètement avec les hémisphères, puis qu'on établisse le contact en un point, on constate, après avoir supprimé le contact et séparé les hémisphères,

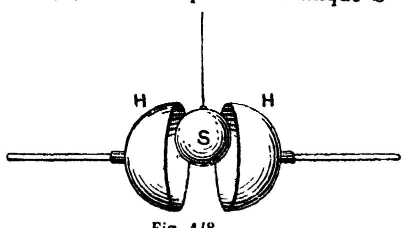


Fig. 148.

(*) Coulomb (1736-1806), physicien français, surtout célèbre par les expériences qui l'ont conduit à énoncer les lois des actions électriques et magnétiques ; il est également l'auteur d'expériences importantes sur le frottement.

(**) Cavendish (1731-1810), célèbre physicien et chimiste anglais, connu surtout par ses travaux sur la composition de l'air et de l'eau.

que S n est plus électrisé, tandis que H et H′ le sont. Un seul point de contact a donc suffi pour faire passer toute l'électricité de l'intérieur à l'extérieur du système.

3° *Cage de Faraday.* — Faraday (*) avait fait construire une grande cage à parois métalliques, portée par des pieds isolants, et dans laquelle il se plaça avec des électroscopes à feuilles d'or, et divers appareils. On mit alors cette cage en communication avec une machine électrique en activité ; elle s'électrisa fortement, au point que de grandes étincelles jaillissaient entre la cage et le sol; néanmoins, quand on faisait communiquer la paroi interne de la cage avec les électroscopes, ceux-ci n'accusaient pas trace d'électricité. De plus, Faraday put répéter, dans ces conditions, diverses expériences simples d'électricité, sans que la charge extérieure de la cage le gênât le moins du monde. Donc, non seulement il n'y a pas d'électricité libre sur les parois intérieures de la cage, mais *la charge extérieure a une action nulle à l'intérieur de tout l'espace limité par les parois métalliques.* — Il n'est d'ailleurs pas nécessaire que les parois conductrices d'une pareille cage forment une surface continue : une cage en toile métallique, même à larges mailles, joue le même rôle qu'une cage à parois pleines.

Si l'on veut répéter, en petit, l'expérience de Faraday, on peut employer le dispositif suivant. Une cloche en toile métallique A (*fig.* 149) est posée sur une feuille de cuivre isolée par une plaque de paraffine P; un électroscope E, placé sous la cloche, communique avec la paroi interne de la cloche, au moyen d'une petite chaîne conductrice *c*. On met la cloche en relation, par une tige de cuivre T, avec une machine électrique en activité, et l'on ne constate aucune divergence des feuilles d'or. L'action de la charge extérieure de A sur l'électroscope est de même nulle, si, ayant supprimé la chaîne *c*, on vient à charger l'électroscope au préalable; la divergence des feuilles est donc indépendante de la charge extérieure de A.

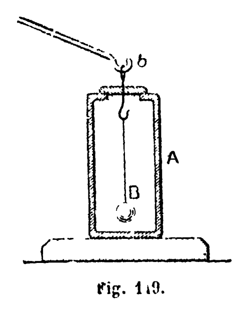


Fig. 149.

144. — ***L'électricité est une grandeur mesurable. — Cylindre de Faraday.*** — De ce fait que l'électrisation des conducteurs est purement superficielle, on peut déduire un moyen de mesurer les charges électriques (**).

(*) Faraday (1791-1867), illustre physicien anglais, connu d'abord par ses travaux sur la liquéfaction des gaz; ses découvertes en Électricité, principalement les lois de l'électrolyse et des phénomènes d'induction électro-magnétique, en ont fait un des savants les plus éminents du XIXe siècle.

(**) Pour qu'une grandeur soit définie comme grandeur mesurable, il faut que l'on

Soit un cylindre métallique creux A, (*fig.* 150) posé sur le plateau d'un électroscope à feuilles d'or, dont *la cage conductrice communique avec le sol* (*) (nous verrons plus tard pourquoi); derrière les feuilles d'or, on a placé un cadran divisé dont le centre correspond à leur point de jonction : quand l'électroscope n'est pas chargé, les feuilles sont verticales et tombent sur la division 0°. Si l'on électrise l'appareil, les feuilles s'écartent toutes les deux de la verticale, et l'angle qu'elles font entre elles se lit immédiatement sur la division. Le système ainsi réalisé s'appelle un *cylindre de Faraday*.

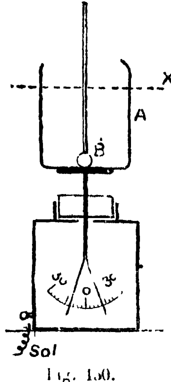


Fig. 150.

Introduisons dans le cylindre une petite boule de cuivre B, électrisée positivement et portée par un manche isolant; les feuilles d'or divergent, et leur angle croît à mesure qu'on enfonce la boule B, jusqu'à ce qu'elle ait atteint une certaine profondeur X; au delà, la divergence reste fixe, quelle que soit la position de B; *elle garde sa valeur, même si* B *vient a toucher le fond du cylindre*; on sait d'ailleurs (143) que la charge de B passe alors intégralement sur la surface extérieure du conducteur constitué par le cylindre et l'électroscope (**).

Si maintenant on décharge le cylindre en le mettant en communication avec le sol, et qu'on recommence l'expérience avec une autre boule B', électrisée positivement, on observera une nouvelle divergence des feuilles; et, suivant que cette nouvelle divergence sera *supérieure, inférieure ou égale* à la précédente, on dira que *la charge de* B' *est supérieure, inférieure, ou égale à celle de* B. — Supposons, à présent, qu'on plonge à la fois dans le cylindre deux boules B et B', toutes deux positives, on observera une certaine divergence (***) des feuilles d'or : tout corps électrisé positivement qui, plongé dans le cylindre, donnera la même divergence, contiendra, *par définition*, une charge positive, égale à la somme des charges de B et de B'.

145. ***Graduation de l'électroscope à feuilles d'or. — Électromètre***

ait pu définir d'une part l'*égalité* et d'autre part l'*addition* de deux grandeurs de l'espèce considérée. Pour faire effectivement la mesure, il faut, en outre, choisir une *unité*, et effectuer une *expérience de mesure*, c'est-à-dire une expérience qui permette de comparer la grandeur à mesurer à l'unité choisie.

(*) Il est avantageux, pour avoir une bonne communication avec le sol, de relier la cage de l'électroscope à une conduite d'eau par un fil métallique.

(**) Nous admettons ici implicitement le principe de la conservation de l'électricité, que nous établirons un peu plus loin (148).

(***) Cette divergence n'est pas égale à la somme des divergences obtenues en plongeant séparément B et B' dans le cylindre.

pour la mesure des charges. — Partant de là, il est facile de graduer l'électroscope de manière à en faire un appareil propre à mesurer des charges électriques, c'est-à-dire de le transformer en *électromètre*. On plongera dans le cylindre une boule B contenant une certaine charge *positive*, prise arbitrairement pour unité, et l'on notera l'écart des feuilles, soit a_1 ; on déchargera l'appareil, et l'on déterminera l'écart a_2 produit par deux sphères égales à B et contenant chacune la charge unité ; et ainsi de suite. Puis on dressera une table à deux colonnes, indiquant les divergences a_1, a_2, a_3,... produites par des charges valant 1, 2, 3,... fois la charge arbitraire prise comme unité (*). — De même on prendra comme unité d'électricité *négative*, la charge négative qui produit un écart a_1 des feuilles, égal à celui que produit l'unité de charge positive ; les charges négatives qui produiront les écarts a_1, a_2, a_3,... vaudront, par définition, 1, 2, 3,... unités d'électricité négative.

Remarque. — La graduation de l'électromètre peut être légèrement simplifiée, en pratique, grâce à une propriété particulière du cylindre de Faraday.

Si l'on introduit dans le cylindre une boule positive B, et qu'on opère le contact, puis qu'on y plonge une seconde boule B' également positive, la divergence finale est la même que si l'on y avait plongé simultanément B et B'. Il résulte de là que, pour avoir sur l'électrometre des charges égales à 1, 2, 3... fois la charge prise pour unité, il suffira de plonger 1, 2, 3... fois successivement une boule portant la charge unité et d'opérer, à chaque fois, le contact avec le cylindre.

146. ***Mesure d'une charge électrique.*** — La *mesure* de la charge d'un corps électrisé se fera alors de la manière suivante : on déterminera d'abord le signe de cette charge (141), puis le corps sera introduit dans le cylindre de Faraday ; on notera la divergence des feuilles, et l'on cherchera, dans la table de graduation, la valeur de la charge correspondante. Il sera d'ailleurs *inutile de toucher le fond du cylindre avec le corps*, puisque, d'après l'expérience fondamentale citée plus haut (144), la divergence est la même, que le contact ait lieu ou non, pourvu que le corps chargé ait été plongé assez profondément dans le cylindre.

147. ***Unité d'électricité.*** — On emploie, comme *unité légale* de charge électrique, le **coulomb** dont nous donnerons plus loin la définition légale (243). Cette unité est incomparablement plus grande

(*) Pour avoir des charges *égales* sur des sphères identiques, il suffit de mettre ces sphères en contact avec l'une des armatures d'une batterie modérément chargée (186), dont l'autre armature communique avec le sol. — On peut encore mettre ces sphères en contact avec le pôle positif d'une pile de quelques centaines d'éléments, dont le pôle négatif sera au sol (251).

que les charges électriques que nous avons envisagées jusqu'ici (*); mais elle est relativement petite par rapport aux quantités d'électricité que l'on manie industriellement.

148. ***Conservation de l'électricité. — Expériences fondamentales.*** — Prenons une sphère A chargée d'électricité vitrée; au moyen du cylindre de Faraday, mais *sans toucher* le cylindre, mesurons sa charge, soit 5 unités, puis mettons-la en contact avec une sphère B isolée; après le contact, mesurons séparément les charges m et m' des deux sphères. Trois cas peuvent se présenter :

1° : B *était primitivement à l'état neutre.* — L'expérience montre alors que $m + m' = 5$.

2° : B *possédait primitivement une charge vitrée.* — Si cette charge valait, par exemple 3 unités, on trouve que $m + m' = 5 + 3 = 8$ unités.

3° : B *possédait primitivement une charge résineuse.* — Cette charge valant par exemple 2 unités, on trouve que m et m' sont toutes les deux des charges vitrées, et que $m + m' = 5 - 2$, ou 3 unités. Si la charge résineuse de B avait été égale à 9 unités, les deux charges m et m' auraient été toutes deux résineuses, et l'on aurait trouvé que $m + m' = 9 - 5 = 4$.

En particulier, si la charge résineuse de B et la charge vitrée de A ont le même nombre pour mesure, c'est-à-dire si ces charges sont *équivalentes*, on trouve que, après le contact, les deux sphères sont neutres; chacune des charges m et m' est égale à zéro. De ces faits, résulte le principe expérimental suivant, qu'on appelle *Principe de la conservation de l'électricité* :

Si un système de conducteurs est isolé, la répartition des charges électriques sur ces conducteurs peut changer, mais leur somme algébrique reste invariable, à condition d'envisager comme des grandeurs positives, et d'affecter du signe + les charges d'une certaine espèce, et comme des grandeurs négatives et d'affecter du signe — les charges d'espèce différente. En d'autres termes, *on ne peut produire ou détruire une certaine quantité d'électricité, sans produire ou détruire une quantité équivalente d'électricité contraire.*

En pratique, on est *convenu* de regarder comme *positives* les charges d'électricité *vitrée*, et comme *négatives* les charges d'électricité *résineuse.*

149. ***Application du principe de la conservation de l'électricité au cylindre de Faraday : Addition des charges.*** — Il résulte

(*) Pour s'en faire une idée, il suffit de savoir qu'une sphère de 10 centimètres de diamètre, chargée par une machine, et capable de donner une étincelle de 2 centimètres de long quand on en approche une autre sphère communiquant avec le sol, en contient que 0,000 0003 coulomb.

immédiatement du principe de la conservation de l'électricité la conséquence suivante, qui est d'une grande importance : si, dans le cylindre de Faraday, on plonge divers corps chargés d'une manière quelconque, et qu'on les mette en contact soit entre eux, soit avec la paroi intérieure du cylindre, la divergence observée ne dépendra que de la *somme algébrique* des charges introduites, et, par suite, pourra mesurer cette somme. Cette propriété fait, du cylindre de Faraday, un instrument précieux en Électrostatique; c'est sur elle qu'est fondée, en somme, la méthode de graduation de l'électromètre pour la comparaison des charges (145).

150. ***Application du principe de la conservation de l'électricité à l'électrisation par frottement.*** — Considérons deux corps isolés, à l'état neutre; leur charge totale est nulle. On les électrise en les frottant l'un contre l'autre; d'après le principe de la conservation de l'électricité, les charges développées par frottement sont égales et de signes contraires, puisque leur somme doit rester nulle. Ce résultat est facile à vérifier par diverses expériences : nous en décrirons deux seulement, qui sont très démonstratives.

1° Une éprouvette A (*fig.* 151) contient du mercure bien sec (*), qui communique par un fil métallique avec la boule d'un électroscope E. En plongeant une baguette de verre B dans le mercure, on électrise le verre et le mercure; mais les feuilles d'or ne divergent pas. Si l'on retire la baguette, les feuilles divergent fortement (*fig.* 152); la baguette elle-même est chargée, mais d'électricité contraire à celle du mercure, comme on peut s'en assurer avec un second électroscope E'. Les charges de signes contraires ainsi développées sont bien égales, car si l'on replonge dans le mercure la *même portion* de la baguette, les feuilles d'or retombent.

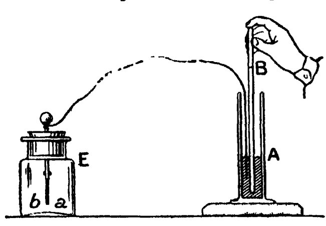


Fig 151

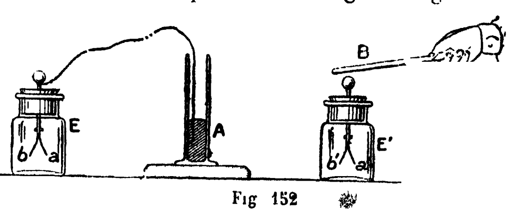


Fig 152

2° Deux personnes sont isolées sur des plaques de paraffine; chacune d'elles communique par le doigt avec un électroscope; si l'une vient

(*) On réalise l'isolement parfait de l'éprouvette en la posant sur une plaque de paraffine.

frapper l'autre avec une peau de chat, les feuilles d'or des deux électroscopes divergent fortement ; si les deux expérimentateurs se mettent en communication par l'autre main, ils reviennent à l'état neutre et les feuilles d'or des deux électroscopes retombent immédiatement : il y avait donc eu production de charges électriques égales et de signes contraires.

151. ***Loi des attractions et des répulsions électriques.*** — A la suite d'expériences célèbres, que nous ne décrirons pas, Coulomb a établi que *l'attraction ou la répulsion qui s'exerce entre deux très petits corps électrisés, plongés dans un isolant, est dirigée suivant la droite qui les joint, proportionnelle aux charges électriques m et m' des deux corps, et en raison inverse du carré de leur distance r; c'est-à-dire qu'elle peut être représentée par*

$$f = K\frac{mm'}{r^2},$$

où K est un coefficient dont la valeur numérique dépend de la nature du milieu isolant, supposé indéfini, dans lequel les deux corps sont plongés, et des unités avec lesquelles m, m', r et f sont mesurées.

Si, en particulier, les forces f étaient mesurées en kilogrammes, les distances r en mètres et les charges électriques en coulombs, le coefficient K aurait pour valeur numérique $K = 9{,}17.10^8$, sa valeur est sensiblement la même dans l'air et dans les autres gaz.

En électricité on se sert souvent d'un système d'unités, dit *système* C. G. S., que nous étudierons plus tard (Classes de Mathématiques A et B) et dans lequel on prend pour unité de *longueur* le *centimètre*, et pour unité de *force* la *dyne*, qui vaut la 981ᵉ *partie du poids du gramme*; si l'on adopte ces unités, et que l'on mesure encore m et m' en coulombs, le coefficient K a pour valeur $K = 3^2.10^{18}$. — La formule précédente exprime l'une des lois fondamentales de l'Electricité.

II. — Distribution de l'électricité.

152. ***Étude de la couche superficielle d'un conducteur électrisé. — Méthode du plan d'épreuve.*** — Nous avons établi (143) que l'électrisation d'un conducteur est purement superficielle ; la méthode du *plan d'épreuve*, due à Coulomb, permet d'en étudier la répartition.

On applique successivement, sur les divers points A, A' (*fig.* 153) de la surface électrisée, un *plan d'épreuve*, formé d'un petit disque métallique N, fixé à l'extrémité d'une mince tige de verre paraffiné P, portée par un manche isolant M (*fig.* 153). A chaque contact, le disque se substitue à la petite portion de surface qu'il recouvre; si on le retire bien normalement, il emporte la charge qui se trouvait sur cette petite surface, et l'on peut mesurer cette charge en introduisant le plan d'épreuve dans le cylindre de Faraday (146).

— En répétant l'expérience pour divers points de la surface du conducteur, on aura, par les indications de l'électromètre, une évaluation numérique des quantités d'électricité réparties sur des surfaces égales, en ces divers points.

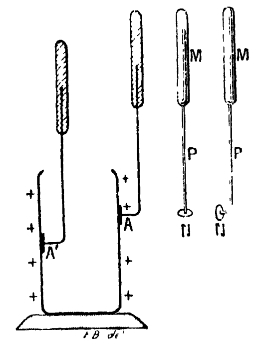


Fig. 153.

153. ***Densité électrique.*** — On appelle *densité électrique en un point* la charge *sur l'unité de surface* (un centimètre carré) prise autour de ce point. — Dans une expérience faite avec le plan d'épreuve, si l'on désigne par s la surface du disque en centimètres carrés, et si q est la quantité d'électricité dont il s'est chargé, la densité électrique, au point qui aura été touché, sera représentée par le quotient de la quantité q par s.

On trouve ainsi que, sur *une sphère*, soustraite à toute influence, la densité électrique est la même en tous les points : c'est ce qu'on devait prévoir, par raison de symétrie. — Sur un *ellipsoïde* de révolution allongé(*), éloigné de tout autre conducteur, les densités électriques à l'extrémité du grand axe et en un point de l'équateur, sont proportionnelles aux longueurs des axes de l'ellipse méridienne.

Enfin sur un *disque circulaire* à bords arrondis, la densité électrique est minimum au centre et maximum sur la circonférence.

D'une manière générale, chaque conducteur, éloigné de tout autre, présente un mode *unique* de distribution superficielle, déterminé par sa forme, et l'on dit que, dans ces conditions, l'électricité est en *équilibre* à sa surface.

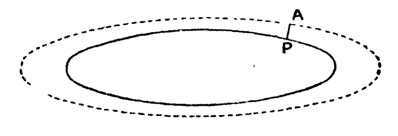
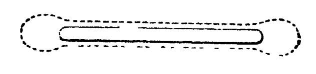


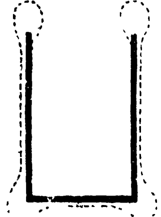
Fig. 154.

On peut représenter graphiquement la distribution de l'électricité sur un conducteur. En chaque point P (*fig.* 154) de la surface du conducteur, menons une normale PA valant autant d'unités de longueur que la densité en ce point vaut d'unités; l'ensemble des points tels que A forme une surface qui enveloppe le conducteur et qui représente aux yeux la répartition de l'électricité sur le corps étudié. Les figures 154, 155 et 156 montrent la distribution sur un ellipsoïde de

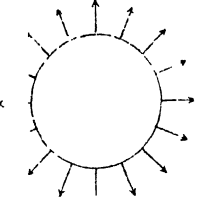

Fig. 155.

(*) C'est la surface obtenue en faisant tourner une ellipse autour de son grand axe.

révolution, sur un disque circulaire et sur un cylindre creux; on y remarque, entre autres choses, que la densité est maximum sur les parties saillantes, et très faible ou nulle sur les parties plates ou rentrantes.


Fig. 156.

154. ***Pression électrostatique.*** — Considérons l'électricité placée sur une très petite portion (un millimètre carré, par exemple) de la surface d'un conducteur électrisé, en équilibre électrique; elle est soumise à la répulsion provenant du reste de la charge du conducteur. Cette force répulsive est *normale* à la surface électrisée, et, par suite, a pour effet de solliciter l'électricité à sortir du conducteur pour passer sur l'air extérieur. Cette force ne peut pas être oblique, car elle aurait alors une composante tangente à la surface, qui ne rencontrerait aucune résistance à faire glisser l'électricité sur la surface conductrice, ce qui est contraire à l'hypothèse faite, à savoir que le conducteur est en équilibre électrique. — Toutes ces forces normales (*fig.* 157), appliquées à l'électricité répandue aux différents points de la surface électrisée, ont, pour *chaque centimètre carré*, une résultante à laquelle on a donné le nom de *pression électrostatique*. Cette résultante, est, en chaque point, *par centimètre carré, proportionnelle au carré de la densité électrique en ce point*; le calcul le montre et le raisonnement suivant permet de s'en rendre compte. L'action exercée sur la charge placée sur 1 cm² (densité), par l'électricité répandue sur le reste du corps, est proportionnelle aux charges agissantes (151). Si donc on double la charge totale, la densité devient double sur chaque point, et en particulier au point considéré; la charge repoussée est donc devenue double; la charge agissante est aussi devenue double; par suite, l'action totale a été multipliée par 4, c'est-à-dire qu'elle est proportionnelle au carré de la densité. — Cette pression est analogue à celle qu'un gaz exerce sur les parois de son enveloppe.


Fig. 157.

155. ***Pouvoir des pointes.*** — Si la densité électrique acquiert une valeur assez grande, la pression électrostatique pourra devenir notable, et produire, sur le milieu isolant contre lequel elle est appliquée, des effets mécaniques plus ou moins énergiques. Si, par exemple, l'isolant est solide, il pourra être brisé; s'il est gazeux, comme l'air, il se mettra en mouvement, comme il le fait sous

l'influence de l'excès de pression produit à l'orifice de la buse d'un soufflet. — L'expérience et le calcul sont d'accord pour montrer qu'un moyen pratique d'avoir, en un point d'un conducteur, une grande densité électrique, consiste à le munir d'une pointe aiguë. Si l'on met alors ce conducteur en communication avec une machine électrique en activité, la pression à la pointe chasse l'air avec une certaine vitesse; on peut mettre en évidence le courant d'air ainsi produit, en rendant l'air visible, soit avec de la fumée, soit avec la flamme d'une bougie (*fig.* 158). L'air, ainsi chassé, entraîne avec lui l'électricité du conducteur, qui est rapidement ramené à l'état neutre. — Cet écoulement d'électricité est accompagné de phénomènes lumineux remarquables; si le conducteur est chargé positivement, la pointe porte une aigrette violette assez pâle; si le conducteur est chargé négativement, la pointe porte une petite étoile brillante.

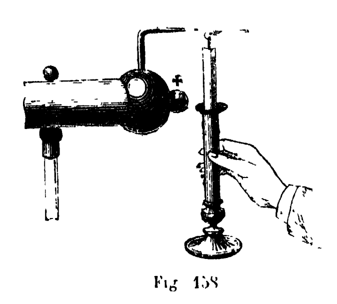


Fig 158

Comme la répulsion est réciproque entre l'air électrisé et la pointe, si la pointe est mobile, elle se mettra en mouvement en sens contraire de l'air; cette condition est réalisée dans le *tourniquet électrique*. — Cet appareil, représenté par la figure 159, se compose de plusieurs tiges métalliques horizontales, terminées par des pointes courbées toutes dans le même sens; ces tiges sont fixées à une chape métallique, mobile sur un pivot métallique vertical isolé, qui est mis en communication avec la machine électrique. L'appareil se met en mouvement en sens inverse de la direction des pointes, c'est-à-dire dans le sens de la flèche qu'indique la figure.

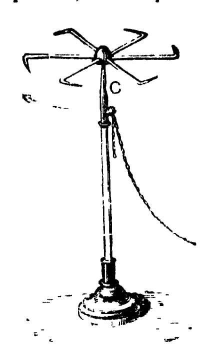


Fig 159.

On comprend, d'après ce qui précède, que l'on doit avoir soin d'éviter les pointes et les arêtes vives, sur les conducteurs qui devront conserver leur électricité : on les limite par des surfaces arrondies.

III. — Champ électrique. — Phénomènes d'influence.

156. ***Définition du champ électrique.*** — Considérons un conducteur C électrisé positivement, par exemple. Si l'on approche de

ce conducteur un pendule électrique OA (*fig.* 160) isolé et chargé d'électricité positive, on voit que le pendule ne reste pas vertical; le pendule est donc soumis, outre son poids, à une certaine force, F. Si l'on porte le pendule en un autre point B, il subira une répulsion F′, différente de F en grandeur et en direction. Donc, dans tout l'espace qui environne C, s'exercent des forces électriques : on dit qu'autour de C existe un *champ électrique*; et l'on appelle *direction du champ en un point, la direction de la force que ce corps exerce sur un très petit corps électrisé positivement, et placé en ce point.*

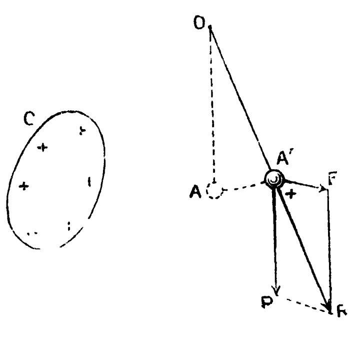


Fig. 160.

Il est évident que, si la charge électrique de C devient double, la densité sera double en chaque point, et la force électrique exercée en A sur le même pendule sera elle-même double (151, loi de Coulomb).

Nous verrons plus loin que, dans l'atmosphère terrestre, il existe habituellement, par temps clair, un champ électrique dirigé verticalement vers le sol, ce qui semble indiquer que la Terre est électrisée négativement.

157. ***Champ nul à l'intérieur d'un conducteur électrisé.*** — L'expérience de la cage de Faraday (143) montre qu'une charge électrique répartie sur la surface extérieure d'un conducteur creux n'a aucune action sur un point intérieur à cette surface; donc, à l'intérieur d'un conducteur électrisé en équilibre, le champ électrique produit par sa propre charge est nul.

Nous allons voir qu'il en est de même pour un conducteur primitivement à l'état neutre, apporté dans le champ d'un conducteur électrisé. C'est ce qui va résulter d'une propriété remarquable du champ électrique, l'électrisation par influence, que nous allons maintenant étudier.

158. ***Influence ou induction électrostatique.*** — L'expérience a montré que si l'on place un électroscope dans un champ électrique, en le mettant, par exemple, au voisinage d'un corps électrisé, les feuilles d'or divergent; leur répulsion provient de ce qu'elles sont électrisées. Donc, *si l'on place un conducteur dans un champ électrique, ce conducteur s'électrise.*

On appelle *influence*, ou *induction électrostatique*, ce mode particulier d'électrisation. Le corps chargé qui produit le champ, s'ap-

pelle *inducteur*; le conducteur électrisé par influence s'appelle le corps *induit*.

Nous nous bornerons à étudier l'influence dans un cas simple, le seul qui présente un intérêt pratique. Nous supposerons que la *charge inductrice* est placée dans l'intérieur d'un conducteur creux, et nous examinerons l'influence qu'elle exerce, d'abord sur le conducteur creux lui-même, puis sur un conducteur isolé placé dans la cavité, en présence de la charge inductrice.

159. ***Influence exercée sur un conducteur creux par une charge inductrice placée dans la cavité. — Théorème de Faraday.*** — Pour faire cette étude, nous emploierons le conducteur creux déjà décrit sous le nom de cylindre de Faraday (144); cela nous permettra, en outre, de nous rendre compte du fonctionnement de cet appareil.

Les phénomènes sont un peu différents suivant que le conducteur creux est isolé, ou communique avec le sol.

1° *Le conducteur creux est isolé.* Portons, dans le conducteur creux B isolé, une sphère A (*fig.* 161) électrisée positivement et contenant une charge $+M$; un plan d'épreuve (152), appliqué successivement sur les deux faces de B, montre que la face interne est négative, et la face externe positive. Le principe de la conservation de l'électricité (148) exige que ces deux charges soient égales et de signes contraires; et, en effet, si l'on retire A, les feuilles d'or qui divergeaient retombent, et B revient à l'état neutre. Enfonçons maintenant A assez profondément, dans le cylindre, les feuilles d'or prennent une divergence fixe, et cette divergence ne change pas quand, avec A, on touche le fond du cylindre; or, en opérant ainsi le contact, on fait passer, purement et simplement, la charge $+M$ de A sur la surface externe de B (143); comme cela ne change rien à la divergence des feuilles, c'est donc que la charge $+M$ s'y trouvait déjà (*); par suite, il y avait une charge $-M$ sur la paroi interne, et cette charge a servi à neutraliser la charge de A (148).

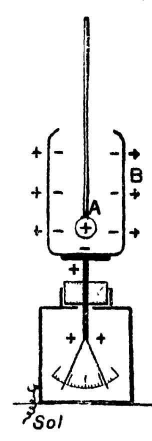


Fig 161.

Donc, *si un conducteur creux isolé est soumis à l'influence d'un conducteur électrisé placé dans la cavité, il se développe, sur la paroi externe du conducteur une charge induite égale à celle du corps inducteur, et sur la paroi interne de la cavité une charge encore égale mais de signe contraire.*

(*) C'est à cause de ce fait que, dans la mesure d'une quantité d'électricité au moyen du cylindre de Faraday (146), il n'est pas nécessaire de toucher le cylindre avec le corps; la charge développée sur la surface extérieure du cylindre étant égale à celle du corps.

2° *Le conducteur creux communique avec le sol.* En plongeant encore la sphère A (*fig.* 162) chargée de + M d'électricité, on constate d'abord que les feuilles d'or ne divergent pas; donc, en premier lieu, *il n'y a pas d'électricité libre sur la surface extérieure de B* (*), et, de plus, *les charges contenues dans la cavité ont une action extérieure nulle.* — Il est facile de voir, en outre, que comme dans le cas précédent, *la paroi interne de la cavité est chargée d'électricité négative, en quantité égale à — M*; en effet, coupons la communication de B avec le sol, puis retirons A sans toucher au cylindre; la charge induite, n'étant plus retenue sur la paroi de la cavité par l'attraction de A, se distribue sur la surface extérieure de B (143) et fait diverger les feuilles. Si l'on touche alors un point quelconque du cylindre avec A, sphère et cylindre reviennent exactement à l'état neutre; ils possédaient donc des charges égales et contraires. — Ces divers résultats expérimentaux constituent le *théorème de Faraday* sur l'influence.

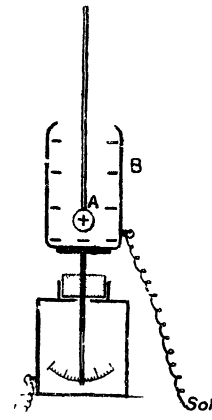


Fig. 162.

160. ***Influence exercée sur un conducteur isolé, placé en présence d'une charge inductrice, à l'intérieur d'un conducteur creux.*** — Nous prendrons ici comme conducteur creux les murs de la salle (*fig.* 163). Un cylindre isolé *cc'*, d'abord à l'état neutre, est placé dans le champ créé par une sphère A électrisée positivement; un plan d'épreuve, appliqué successivement aux deux extrémités *c* et *c'*, montre que la région *c*, voisine de A, est négative, et que la région *c'*, la plus éloignée de A, est positive; ces deux régions sont séparées par une ligne sans électricité, ou *ligne neutre*. Les charges ainsi développées sont équivalentes, car si l'on supprime A, le cylindre revient à l'état neutre; leur valeur numérique ne présente d'ailleurs aucune relation simple avec la charge + M de A; mais la charge

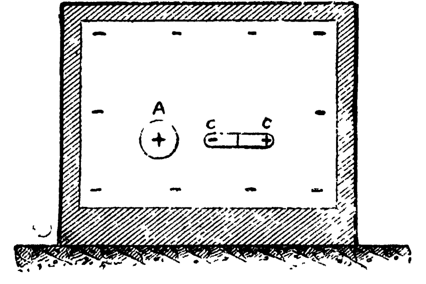


Fig. 163.

(*) Il était en effet à prévoir que la charge + M, qui reste sur la surface extérieure du cylindre quand il est isolé, se perd dans le sol si l'on établit la communication.

négative produite en c est toujours *inférieure* à M, en valeur absolue.

Il est évident que, si l'on fait communiquer le cylindre avec les murs de la salle, il fait partie du conducteur creux qu'ils constituent, et il est chargé uniquement d'électricité négative; la charge prise ainsi par cc' est encore *plus petite* que celle de A, en valeur absolue, car A induit une charge égale à la sienne sur les parois de la salle, dont le cylindre fait partie; la majeure partie de cette charge se localise sur le cylindre, à cause de sa proximité de A, mais il en reste nécessairement une fraction sur les parois de la salle (*).

Si le corps induit est déjà électrisé, il subit l'influence comme s'il était à l'état neutre; les charges induites se superposent simplement aux charges primitives, la densité électrique en chaque point devenant la somme algébrique de la densité primitive et de la densité de la charge induite en ce point.

161. ***Écrans électriques.*** — En résumé, le champ électrique ne peut exister que dans les isolants. Toute masse conductrice apportée dans un champ électrique se charge par influence de façon que son intérieur soit soustrait à l'action du champ. Il résulte immédiatement de là que, pour protéger un appareil quelconque contre l'action d'un champ électrique, il suffira de l'enfermer dans une cage métallique qui jouera le rôle d'*écran électrique*.

162. ***L'influence ne se produit qu'à travers les isolants ou diélectriques.*** — L'influence ne peut se produire à travers les conducteurs. Nous venons de voir, en effet (159) que, si une portion de l'espace est séparée du reste par une cloison conductrice, les phénomènes électriques qui se passent d'un côté de la cloison n'ont aucun effet de l'autre côté (propriété des écrans électriques). — C'est donc seulement à travers les isolants que l'influence peut se produire, d'où le nom de *diélectriques* que Faraday leur a donné.

D'ailleurs les vérifications expérimentales que nous avons indiquées lorsque le diélectrique est l'air peuvent se répéter avec un cylindre de Faraday rempli de tout autre diélectrique, par exemple de pétrole, de benzine, de paraffine ou de vaseline fondues, etc...; elles conduisent à des conclusions identiques : une charge positive induit *nécessairement*, sur l'ensemble des conducteurs voisins, une charge négative équivalente, à travers le diélectrique interposé.

163. ***Applications des phénomènes d'influence.*** — 1° *Attraction des corps légers : Pendule isolé et pendule non isolé.* — C'est en s'appuyant sur le développement de l'électricité *par influence*, que

(*) Les conclusions auxquelles on vient d'arriver pourraient être inexactes si, au lieu d'opérer dans une salle fermée, on opérait à l'air libre, en un lieu découvert : l'induction proviendrait alors, non seulement du champ électrique créé par le corps inducteur, mais aussi du champ qui existe naturellement dans l'air. Nous dirons plus loin quelques mots des phénomènes d'induction que produit le champ électrique terrestre.

l'on peut expliquer les mouvements que les corps électrisés impriment aux corps conducteurs *préalablement à l'état neutre.* — Présentons, par exemple, un bâton de verre V (*fig.* 164), chargé d'électricité positive, à une balle de sureau BC, isolée par un fil de soie, et à l'état neutre : il se développe par influence, dans les régions B et C, de l'électricité négative et de l'électricité positive. La balle de sureau est donc sollicitée par deux forces, savoir : une force *attractive*, due à l'action de l'électricité positive du verre sur l'électricité négative de la région B, et une force *répulsive*, due à l'action de l'électricité positive du verre sur l'électricité positive de la région C. L'attraction, s'exerçant à une distance moindre (151), l'emporte sur la répulsion, et la balle se met en mouvement vers le bâton de verre.

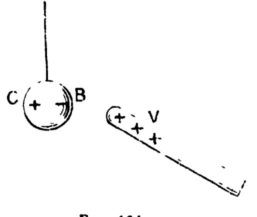


Fig. 164.

Pour constater qu'un corps est électrisé, un pendule *non isolé* sera plus sensible qu'un pendule *isolé*. En effet, par induction, le pendule non isolé ne se charge que de l'électricité contraire à celle du corps électrisé qu'on en approche, puisqu'il communique avec les parois de la salle; l'attraction n'est donc alors contre-balancée par aucune répulsion.

2° *Emploi de l'électroscope à feuilles d'or, pour déterminer le signe de l'électrisation d'un corps.* — On peut utiliser les phénomènes d'influence pour reconnaître, au moyen de l'électroscope, si un corps est électrisé, et de quelle espèce d'électricité il est chargé, sans lui emprunter aucune portion de cette électricité. On approche du bouton de l'électroscope le corps à étudier; s'il est électrisé, les feuilles divergent. On touche alors le bouton avec le doigt : les feuilles retombent ; on supprime la communication avec le sol, puis on éloigne le corps inducteur : les feuilles se remettent à diverger, sous l'action d'une électricité de signe contraire à celle du corps soumis à l'expérience. Il n'y a donc plus qu'à chercher de quelle électricité l'électroscope est chargé. — Pour cela, on électrise positivement un bâton de verre poli, en le frottant avec du drap, et on l'approche, *lentement et de loin*, du bouton de l'électroscope. Si la divergence des feuilles augmente, c'est que la charge des feuilles est augmentée, en valeur absolue, par l'influence du bâton de verre, car l'état électrique provoqué par cette influence se superpose à l'état électrique initial (160). Or le bâton de verre a induit, dans les feuilles, de l'électricité positive; l'électroscope était donc, dans ce cas, chargé positivement, et le corps qui a servi à le charger par influence était chargé négativement. — Si, au contraire, les feuilles se rapprochent, c'est que leur quantité d'électricité diminue, en

valeur absolue, par l'induction du bâton de verre; l'électricité primitive des feuilles était donc négative et le corps soumis à l'expérience était électrisé positivement.

Remarque. — Dans ce dernier cas, si l'on continue à approcher progressivement le bâton de verre, il arrive un moment où les feuilles redeviennent verticales; c'est qu'alors l'électricité positive induite par le verre neutralise exactement dans les feuilles l'électricité négative initiale; les feuilles sont alors à l'état neutre. Si l'on rapproche encore le bâton de verre, on constate une nouvelle divergence des feuilles, d'autant plus grande qu'on approche davantage le verre; cette nouvelle divergence est provoquée maintenant par l'excès d'électricité positive induite dans les feuilles par le verre. On conçoit donc qu'il est nécessaire, dans ces expériences, d'approcher *lentement et de loin* le bâton de verre, afin de ne pas confondre cette divergence finale, qui peut être plus grande que la divergence initiale, avec un accroissement de divergence. On se croirait alors dans le cas précédent, c'est-à-dire que l'on serait conduit à une conclusion inverse de la conclusion réelle.

3° *Électrophore.* — L'électrophore se compose d'un disque isolant A (*), fixé sur une plaque métallique B (*fig.* 165). En battant A avec une peau de chat, on l'électrise négativement. On pose, sur le disque, un plateau conducteur P, porté par un manche isolant; une cheville métallique *t*, fixée à la plaque métallique, traverse le disque isolant et dépasse très légèrement sa surface; le plateau P, en communication avec le sol par cette tige, est soumis à l'influence du disque A électrisé négativement, il prend donc une charge positive (160). Si on soulève le plateau, en le prenant par le manche isolant, et qu'on l'éloigne du disque, il reste chargé positivement : il peut donner une étincelle quand on l'approche d'un corps en communication avec le sol.

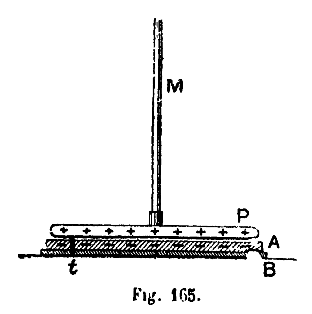


Fig. 165.

Cette manœuvre n'a d'ailleurs rien enlevé au disque isolant; on pourra donc répéter cette charge de P autant de fois que l'on voudra. De là le nom de *machine à influence*, donné à cet appareil qui permet de multiplier par influence une charge initiale limitée, développée par le frottement.

164. ***Travail dépensé dans la manœuvre de l'électrophore.*** — Si, après chaque manœuvre de l'électrophore, on porte le plateau élec-

(*) Dans les anciens électrophores, le diélectrique employé était la résine; actuellement, on emploie la paraffine, ou mieux l'ébonite, qui est moins fragile.

trisé P à l'intérieur d'un conducteur creux, et que l'on opère le contact, la charge de ce conducteur croît en progression arithmétique; ce résultat ne peut être atteint qu'en dépensant du travail.

En effet, si l'on veut éloigner le plateau positif P de l'électrophore (*fig.* 165), il faudra vaincre l'attraction produite sur lui par la charge négative fixe de l'isolant (*); de plus, si le cylindre a déjà reçu une charge antérieure, il faudra, en outre, pour forcer P à s'approcher du cylindre, vaincre la répulsion que sa charge positive exerce

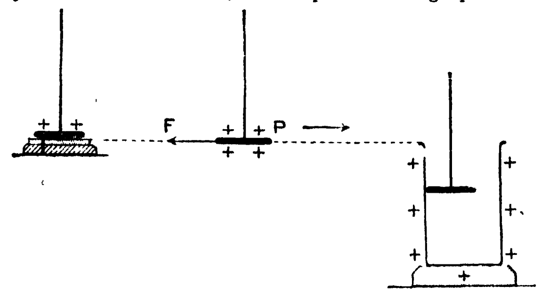


Fig 166.

sur le plateau P. Donc il faut dépenser du travail, puisqu'on force le point d'application de cette résistance à se déplacer en sens inverse de sa direction. — Le travail fourni par l'opérateur, à chaque voyage, est d'autant plus grand que le cylindre était déjà plus chargé, car la force répulsive qui s'exerce sur une charge donnée est proportionnelle à la charge électrique agissante (151).

Ce procédé de charge du cylindre présente une analogie frappante avec l'opération qui consiste à refouler, au moyen d'une pompe foulante, dans un vase cylindrique, de l'eau prise à un réservoir de niveau constant. A chaque coup de piston, il faut accomplir un travail qui a pour valeur (**) le produit du poids de l'eau refoulée par la hauteur à laquelle on l'élève; cette hauteur est d'autant plus grande que l'on a déjà accumulé plus d'eau dans le vase, c'est-à-dire que l'on a déjà donné un plus grand nombre de coups de piston.

IV. — Potentiel électrique.

165. ***Notion expérimentale du potentiel d'un conducteur en équilibre électrique.*** — Mettons un électromètre à feuilles d'or,

(*) Cette attraction est compensée plus ou moins complètement par la répulsion due à la charge positive qui se développe par influence sur la plaque métallique B qui communique avec le sol.

(**) Nouveau Cours de Physique élémentaire. — Sec. C et D. 4e éd., p. 124-125.

dont *la cage métallique est au sol* (*fig.* 167), en communication lointaine (*) avec un point quelconque d'un conducteur électrisé et isolé C : les feuilles divergent. Si l'on déplace la sphère A, la divergence des feuilles reste la même; la divergence est donc indépendante du point de contact; elle reste constante, quelle que soit la

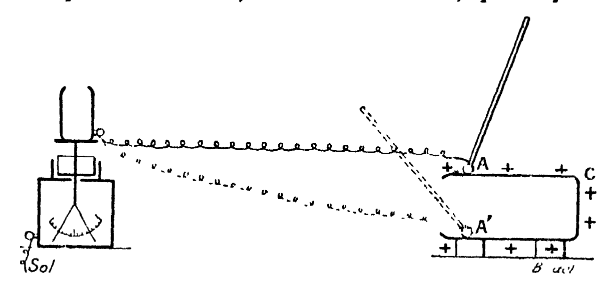


Fig. 167.

densité en ce point. Si même on vient à toucher un point intérieur du conducteur, où la densité est nulle, les feuilles présentent encore la même divergence.

Il y a donc là une propriété, une qualité du conducteur électrisé, qui reste constante dans toute son étendue : on lui a donné le nom de *potentiel électrique*, et l'on dit que *le potentiel a la même valeur en tous les points du conducteur électrisé.*

Si l'électroscope, dans l'expérience précédente, se charge d'électricité *positive*, ce que l'on peut reconnaître facilement (163, 2°), on dit que *le potentiel du conducteur est positif*; si l'électroscope se charge *négativement*, *le potentiel du conducteur est négatif.* Dans le cas particulier où l'électroscope ne se charge pas, où les feuilles restent verticales, on dit que *le potentiel du conducteur est égal à zéro.*

L'expérience montre que tout conducteur, électrisé ou non, et qui communique actuellement avec *le sol* (**) est au potentiel *zéro.* Cette valeur sera donc, *par définition*, *le potentiel du sol.*

Si deux conducteurs électrisés A et B, mis en communication lointaine avec l'électromètre à feuilles d'or, donnent des divergences différentes, on dit que ces deux corps sont à des potentiels différents ; et si le conducteur B produit une divergence correspondant à une charge de l'électromètre *double*, *triple*, etc... (145) de celle que le conducteur A lui avait communiquée d'abord, on dit que *le*

(*) La communication se fait commodément au moyen d'un fil de cuivre long et fin, fixé par une de ses extrémités à la boule de l'électromètre et par l'autre extrémité à une petite sphère métallique A portée par une longue tige isolante.

(**) Ce serait le cas du plateau de l'électrophore posé sur le disque électrisé.

potentiel de B est double, triple, etc... de celui de A. — Si les divergences sont *égales*, les potentiels de A et de B seront dits *égaux*.

166. ***Mesure des potentiels par l'électromètre.*** — On déduit immédiatement de là une méthode pour comparer les potentiels à l'un d'eux pris comme unité. On mettra le corps, dont on veut mesurer le potentiel, en communication lointaine avec l'électromètre, dont la cage métallique sera mise au sol, et l'on dira que le potentiel vaut 1, 2,... *n* unités, suivant que la divergence correspondra à une charge de l'électromètre valant 1, 2,... *n* fois l'unité arbitraire de charge qui aura servi à graduer l'appareil. — L'unité de potentiel, ainsi déterminée, est tout aussi arbitraire que l'unité de charge d'où elle dérive. Il est évident, par définition même, que la grandeur ainsi mesurée n'est que la différence de potentiel entre le corps et le sol (165).

167. ***Le potentiel d'un conducteur isolé est proportionnel à sa charge.*** — Le potentiel d'un conducteur isolé, ainsi défini, possède une propriété remarquable, qu'une expérience simple permet d'établir. Au moyen du plateau d'un petit électrophore (163), communiquons au cylindre C (*fig.* 168) des charges m, $2m$, $3m$,... l'expérience

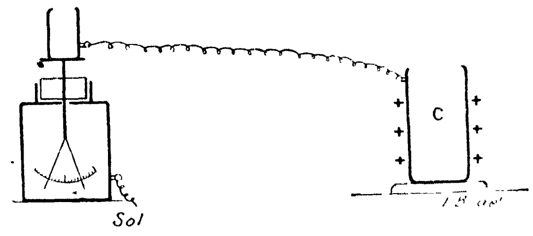


Fig. 168.

montre que son potentiel croît aussi comme la suite des nombres entiers. Le résultat de cette expérience tres importante peut donc se traduire en disant que *le potentiel d'un conducteur isolé est proportionnel à sa charge.*

168. ***Force électromotrice.*** — Considérons actuellement deux conducteurs électrisés positivement, par exemple deux sphères A et B (*fig.* 169); soient M et M′ leurs charges, mesurées en les plongeant successivement dans le cylindre de Faraday, mais en ayant soin de ne pas toucher le cylindre (146). Supposons que l'on ait également mesuré les potentiels V et V′ de ces

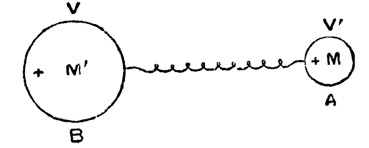


Fig. 169

deux conducteurs. Réunissons maintenant les deux sphères par un fil de cuivre *long et fin*, et étudions ce qui s'est produit. Deux cas sont à distinguer :

1° $V = V'$. — Supprimons la communication, en enlevant le fil avec deux crochets isolants, et mesurons de nouveau les charges dans le cylindre de Faraday : on trouve qu'*elles n'ont pas changé*; et la distribution a dû également rester uniforme, si les deux sphères sont assez loin l'une de l'autre. Donc, *quand on met en communication lointaine deux conducteurs au même potentiel, leur état électrique reste identique à ce qu'il était.*

2° $V > V'$. — Après avoir supprimé la communication, mesurons de même les charges : la charge de A est devenue $M_1 < M$, et celle de B est devenue $M'_1 > M'$; d'ailleurs, la somme des charges est restée fixe, $M + M' = M_1 + M'_1$ (148). De plus, les deux conducteurs, formant pendant la communication un conducteur unique en équilibre, sont au même potentiel V_1 en tous leurs points; et l'expérience montre que l'on a $V > V_1 > V'$.

Si le potentiel V' est négatif, et même si V est aussi négatif, les inégalités que l'on vient d'écrire sont encore exactes, à condition de les envisager comme des inégalités algébriques, et non pas comme des inégalités arithmétiques. Si, par exemple, $V = -2$ et $V' = -5$, le potentiel final sera négatif, et compris entre -2 et -5 : c'est-à-dire que l'on aura : $-2 > V_1 > -5$.

Donc, si l'on met en communication *lointaine* deux corps à des potentiels différents, celui qui est au *potentiel le plus élevé cède de l'électricité positive* à celui qui est au potentiel le plus bas, jusqu'à ce que leurs potentiels soient devenus égaux. Cette différence de potentiel entre les deux corps a donc *déterminé un mouvement d'électricité positive* (*) ; on peut dire que, dans ce cas, la différence de potentiel a joué le rôle d'une *force électromotrice*, c'est-à-dire d'une cause capable de mettre de l'électricité en mouvement.

169. ***Analogie d'une différence de potentiel et d'une différence de niveau en hydrostatique.*** — On peut matérialiser cette notion de différence de potentiel, en l'assimilant à la différence de niveau qui peut exister entre deux réservoirs contenant un liquide pesant, de l'eau par exemple.

Considérons un réservoir A (*fig.* 170), contenant de l'eau jusqu'à un certain niveau, et faisons-le communiquer par un tube de

(*) Il serait aussi logique de dire qu'il y a eu mouvement d'électricité *négative* du corps au bas potentiel vers le corps à potentiel plus élevé; on pourrait même dire qu'il y a eu double mouvement d'électricité; comme nous ignorons, d'une façon absolue, la nature d'un courant électrique, les expressions précédentes ont uniquement pour but d'indiquer comment ont varié les charges des corps mis en communication.

caoutchouc avec un tube de verre E; l'eau se mettra au même niveau dans le tube et dans le réservoir, et cela, quelle que soit la position P ou P′ du point du réservoir par lequel on établit la communication. — Dans l'expérience fondamentale citée plus haut (165), l'électroscope est assimilable au tube indicateur de niveau; la différence de potentiel entre un conducteur et le sol est analogue à la différence de niveau de l'eau dans le tube ou dans le réservoir, avec un plan horizontal déterminé X, pris pour origine des niveaux. On pourra graver sur le tube de verre une échelle de niveaux; le zéro de cette graduation étant astreint à rester dans le plan horizontal origine, si l'on met le tube en communication avec un autre réservoir, on pourra lire le niveau correspondant, comme on lit sur l'électroscope gradué le potentiel d'un conducteur, c'est-à-dire sa différence de potentiel avec le sol.

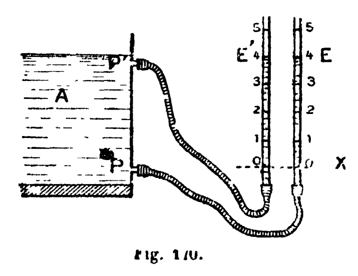


Fig. 170.

L'analogie peut être poussée plus loin. Si l'on met deux réservoirs en communication par un tube, de l'eau passe du réservoir dont le niveau est le plus élevé dans le réservoir dont le niveau est le plus bas, jusqu'à ce que les niveaux se soient égalisés; le poids de l'eau du premier réservoir diminue, et celui du second augmente d'autant. Ce sont des résultats tout à fait semblables à ceux que produit la communication lointaine de deux conducteurs électrisés (168).

170. ***Travail électrique.*** — Cette analogie va même nous permettre d'arriver à une nouvelle conception de la notion de différence de potentiel.

Quand de l'eau tombe d'un certain niveau à un niveau inférieur, le poids de cette eau accomplit un certain travail; chaque kilogramme qui tombe d'un mètre accomplit un travail qui a été pris pour unité dans le système métrique, et qu'on a appelé kilogrammètre (*); on peut d'ailleurs utiliser ce travail pour faire tourner une roue hydraulique ou une turbine, et alimenter ainsi une usine quelconque (moulin, scierie, etc...).

On sait également que, si l'on veut refouler de l'eau d'un niveau donné à un niveau supérieur, il faut dépenser un certain travail, un kilogrammètre par kilogramme d'eau monté d'un mètre. Il résulte de là que l'on pourrait définir une différence de niveau, en indiquant le nombre de kilogrammètres à effectuer pour monter

(*) Voir la première partie du Cours (Classes de Seconde C et D, 4e éd.), page 9.

l'unité de poids d'eau (1 kg), du niveau inférieur au niveau supérieur; en disant qu'il faudrait effectuer 15 kilogrammètres pour monter 1 kg d'eau du rez-de-chaussée au faîte d'une maison, cela reviendrait à dire que la maison a 15 mètres de hauteur.

Il est alors naturel de se poser les deux questions suivantes : 1° Faut-il dépenser du travail pour porter une charge électrique donnée d'un certain potentiel, celui du sol par exemple, à un potentiel plus élevé ? 2° Quand de l'électricité positive tombe d'un certain potentiel à un autre plus bas, celui du sol par exemple, accomplit-elle du travail? La réponse à la première question n'est pas douteuse, nous l'avons déjà donnée plus haut à propos de l'électrophore (164), dont le plateau contient chaque fois de l'électricité qui, d'abord au potentiel zéro, se trouve finalement au potentiel du cylindre. Quant à la seconde question, l'expérience montre qu'il y a également du travail accompli dans ces conditions; car si, pendant sa chute de potentiel (*), l'électricité passe dans un appareil approprié (moteur électrique), on peut utiliser le travail produit.

171. ***Expression du travail électrique. — Nouvelle définition du potentiel.*** — L'analogie remarquable que nous venons de faire ressortir, se poursuit jusque dans l'expression algébrique du travail mis en jeu, comme nous allons maintenant l'établir.

Supposons que l'on veuille porter une charge électrique déterminée $+m$, du potentiel zéro (sol) sur un conducteur A à un potentiel $+V$, et contenant déjà une charge $+M$ (164, cas de l'électrophore); il faudra accomplir un certain travail pour vaincre la force répulsive que M va exercer sur m. Si l'on double la charge de A, on sait (167) que son potentiel mesuré à l'électrometre devient $+2V$: pour porter $+m$ du sol sur A, il faudra maintenant exécuter un travail double; en effet, pendant le trajet, m est soumise à la répulsion de 2M, répulsion qui, à la même distance, est double de celle qu'exerçait M, d'après la loi de Coulomb (151); la résistance à vaincre étant double et le chemin à parcourir restant le même (**), le travail à effectuer sera lui-même double. Donc, *le travail qu'il faut effectuer pour porter une charge électrique positive du potentiel zéro (sol) à un potentiel $+V$, est proportionnel au nombre qui mesure V, la mesure étant faite à l'électromètre.*

Supposons maintenant que, au lieu de $+m$, on veuille porter $2m$ du potentiel zéro (sol) sur le même corps A au potentiel V, et contenant déjà la charge M; le travail à effectuer sera également deux fois plus grand, car la force répulsive à vaincre, provenant de M

(*) Nous verrons plus loin qu'une chute continue d'électricité positive, d'un certain potentiel à un potentiel plus bas, constitue un courant électrique.

(**) Cette condition n'est même pas nécessaire; on établit que le travail à effectuer pour porter $+m$ du sol sur A est indépendant du chemin suivi.

sera double en chaque point, puisqu'elle s'exerce sur une charge $2m$ double de m (151); donc, *le travail qu'il faut effectuer pour porter une charge électrique du potentiel zéro (sol) à un potentiel déterminé V, est proportionnel à la valeur de cette charge mesurée au moyen du cylindre de Faraday.*

D'une manière générale, pour faire monter une charge $+M$ du potentiel zéro au potentiel V, le travail à dépenser sera proportionnel à M et à V, c'est-à-dire au produit $M \times V$. Il est d'ailleurs évident, par suite du principe de la conservation du travail, que si, réciproquement, la charge M tombe *tout entière* du potentiel V au potentiel zéro (sur le sol), elle restituera le même travail. Si M ou V sont négatifs, le travail produit par la charge M faisant *intégralement* une chute de potentiel égale à V est, *en grandeur et en signe*, proportionnel au produit MV; il doit être considéré comme véritablement accompli (travail moteur), s'il est positif; et, au contraire comme absorbé (travail résistant), s'il est négatif.

Nous pouvons donc dire que le potentiel d'un conducteur, défini par la mesure électrométrique (166), peut encore être considéré comme *une grandeur mesurée par le travail qu'accomplit une quantité donnée d'électricité* (par exemple celle qui a été prise comme unité arbitraire dans la graduation du cylindre de Faraday), *quand elle tombe de ce potentiel jusqu'au sol.*

172. ***Unité pratique de potentiel : volt.*** — Pour que la formule donnant le travail accompli par une charge M, qui tombe tout entière du potentiel V au potentiel zéro, soit aussi simple que possible, il suffira de prendre, comme *unité pratique de potentiel, la chute de potentiel pour laquelle l'unité pratique d'électricité, le coulomb, donne une unité pratique de travail, c'est-à-dire un joule* (*); cette unité de potentiel a reçu le nom de **volt** (**).

Cette unité est petite par rapport aux potentiels que produit généralement l'électrisation par frottement; par exemple, pour obtenir une divergence appréciable des feuilles d'or d'un électroscope, il faut le porter au moins à 50 volts. Le plateau de l'électrophore peut facilement donner des étincelles de 2 centimètres quand on en approche le doigt : le potentiel du plateau dépasse alors 30 000 volts; mais, par contre, la charge du plateau est très petite; pour un diamètre d'une trentaine de centimètres, elle est de l'ordre du demi-millionième de coulomb; par suite, le travail nécessaire pour éloigner le plateau du disque isolant reste néanmoins très petit.

(*) Nous rappelons que le joule vaut sensiblement $\frac{1}{10}$ de kilogrammètre $\left(\text{exactement, la fraction } \frac{1}{9,81}\right)$.

(**) En mémoire de Volta, célèbre physicien italien (1747-1827), à qui l'on doit la mémorable invention de la pile, et par suite celle du courant électrique.

En résumé, quand *un coulomb tombe d'un volt*, *il accomplit un joule*; et quand M coulombs tombent *intégralement* de V volts, ils produisent un travail W joules, dont l'expression est :

$$W = MV.$$

Cette formule est d'une importance capitale.

173. *Énergie électrique d'un conducteur électrisé.* — On dit, d'une manière générale, qu'un système matériel possède de l'*énergie*, lorsqu'il est capable de fournir du travail.

Considérons un conducteur électrisé, au potentiel V, et possédant une charge M. On appelle *énergie* électrique de ce conducteur le travail que cette charge électrique fournit quand, en mettant ce conducteur en communication avec le sol, on le ramène à l'état neutre, c'est-à dire au potentiel zéro. On démontre que ce travail, évalué en *joules*, a pour expression :

$$W = \frac{1}{2} MV \text{ (*)}.$$

Il résulte de cette formule qu'un conducteur, communiquant avec le sol, a une énergie électrique nulle *même s'il est chargé* : c'est le cas du plateau de l'électrophore posé sur le disque isolant. — Il en est de même d'un conducteur isolé, chargé par influence ; son énergie électrique est nulle car sa charge totale est elle même nulle.

(*) On peut le démontrer facilement en ayant recours à l'analogie hydrostatique que nous avons déjà invoquée. Considérons un réservoir cylindrique contenant P kg d'eau, et soit h m la hauteur à laquelle s'élève cette eau. Si la base du réservoir est au même niveau qu'une nappe d'eau indéfinie, le travail accompli par l'écoulement complet de l'eau du réservoir jusqu'à cette nappe est, en kilogrammètres,

$$W = \frac{1}{2} Ph.$$

Pour l'établir, supposons que $h = 1$ m et que $P = 100$ kg ; chaque kilogramme qui s'écoule fait alors baisser le niveau de 1 centimètre. Le 1er kilogramme tombe alors d'une hauteur moyenne égale à 0,995 m, et accomplit 0,995 kilogrammètre ; le 2e tombe d'une hauteur moyenne égale à 0,985 m et accomplit un travail de 0,985 kgm ; le 3e tombe de 0,975 m et accomplit 0,975 kgm, etc. ; le 98e ne tombe plus que de 0,025 m et n'accomplit que 0,025 kgm ; le 99e ne tombe plus que de 0,015 m et ne produit que 0,015 kgm ; et enfin le 100e n'accomplit plus que 0,005 kgm, puisqu'il ne tombe que d'une hauteur moyenne égale à un demi-centimètre. Pour calculer facilement le travail total accompli, groupons les travaux partiels de la manière suivante :

Le 1er et le 100e, ce qui donne . . . . . $0,995 + 0,005 = 1$ kgm.
Le 2e et le 99e. — . . . . . $0,985 + 0,015 = 1$ kgm.
. . . .
Et enfin le 50e et le 51e, ce qui donne. . $0,505 + 0,495 = 1$ kgm.

Nous trouvons ainsi 50 groupes, chacun de 1 kilogrammètre, ce qui fait en tout 50 kilogrammètres. Le travail total accompli a donc bien pour valeur la moitié du produit du poids total de l'eau tombée, par la différence primitive de niveau entre le réservoir et la nappe d'eau indéfinie, c'est-à-dire $W = \frac{1}{2} P \times h$.

Ce raisonnement s'applique identiquement à l'électricité d'un conducteur : il suffit de substituer le coulomb au kilogramme d'eau, le volt au mètre et le joule au kilogrammètre.

Il est évident, d'après le principe de la conservation du travail, que cette expression représente également le travail qu'un opérateur devra dépenser pour porter un conducteur isolé du potentiel zéro à un potentiel V en lui fournissant la charge M.

174. *Généralisation de la notion de potentiel. — Potentiel en un point d'un champ électrique.* — Nous avons vu (171) que le potentiel d'un conducteur peut être défini comme étant le travail à dépenser pour porter l'unité d'électricité depuis le sol jusque sur ce conducteur; cette définition s'étend d'elle-même à *un point quelconque d'un champ électrique.*

Si l'on met une petite boule B (*fig.* 171), portée par un manche

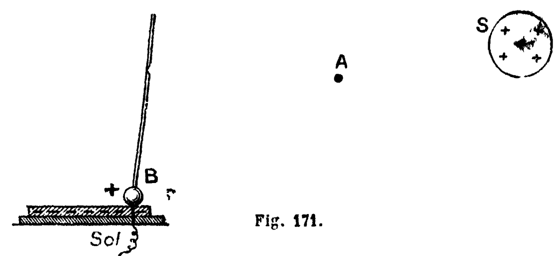


Fig. 171.

isolant, en contact avec la cheville métallique d'un électrophore chargé, elle prend une certaine charge positive, et son potentiel est zéro. Si l'on veut transporter cette boule en A, à une certaine distance d'une sphère S électrisée positivement, et créant, par suite, autour d'elle, un champ électrique, il faudra dépenser un certain travail, puisqu'on aura à vaincre la répulsion de la sphère S sur cette boule. Ce travail, *par unité d'électricité positive* transportée, sera le potentiel au point A du champ.

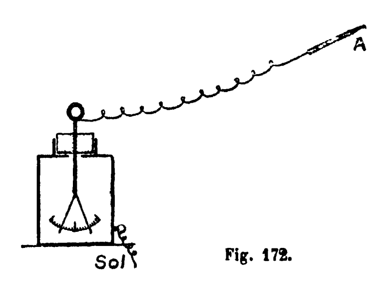


Fig. 172.

175. *Mesure du potentiel en un point d'un champ électrique.* — La mesure du potentiel en un point d'un champ se fait avec l'électromètre à feuilles d'or (145), et en utilisant le pouvoir des pointes. Une pointe d'aiguille, reliée à l'électromètre par un long fil métallique, est placée au point A (*fig.* 172) du champ où l'on veut évaluer le potentiel; d'après le pouvoir des pointes, cette pointe ne peut être en équilibre électrique (155) que si le potentiel du champ au point A est le même que celui de la pointe, et, par suite, que celui de l'électroscope. L'écart des feuilles per-

mettra alors de déterminer le potentiel au point A (*), *à condition que l'électromètre ait été gradué en volts.*

176. *Graduation de l'électromètre à feuilles d'or, pour la mesure des potentiels.* — Pour graduer en volts un électromètre à feuilles d'or, on mettra la boule en communication avec le pôle positif d'une pile de Volta (251) de quelques centaines d'éléments, le pôle négatif de la pile et la cage métallique de l'appareil communiquant avec le sol. On notera les divergences des feuilles produites par 50, 100, 150, 200, etc., éléments en série; sachant que la différence de potentiel entre les pôles d'un élément de pile de Volta est sensiblement 0,85 volt, on en déduira la valeur en volts du potentiel correspondant à une déviation donnée. Mais l'appareil de mesure ainsi réalisé manque de sensibilité; il est nécessaire, en pratique, de pouvoir déterminer des différences de potentiel de l'ordre du volt; on emploie alors l'électromètre à quadrants, imaginé par Lord Kelvin.

177. *Electromètre à quadrants.* — La figure 173 représente l'électromètre à quadrants, sous la forme que lui a donnée Mascart.

Les parties essentielles de cet appareil sont les *quadrants* et *l'aiguille*.

Les *quadrants* sont obtenus en coupant une boîte cylindrique plate, en laiton, par deux traits de scie rectangulaires. On a ainsi quatre secteurs égaux, ou quadrants, *a*, *b*, *a'*, *b'* (*fig.* 174), que l'on évide au centre. On les met en com-

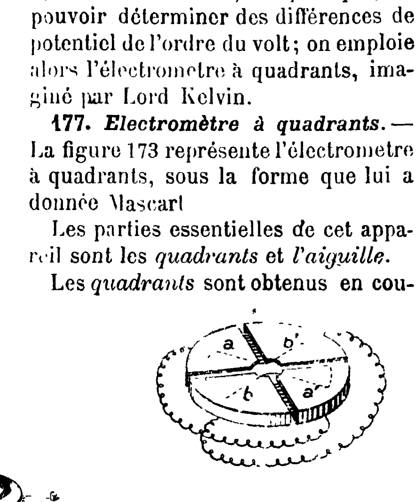


Fig. 173

Fig. 174.

(*) La pointe n'étant jamais parfaite, ce procédé donne des résultats assez peu précis; nous indiquerons un meilleur dispositif, à propos de l'étude du champ électrique qui existe normalement dans l'atmosphère terrestre (578).

munication métallique deux à deux et en croix, c'est-à-dire que l'on fait communiquer a avec a' et b avec b'.

L'*aiguille* A (*fig.* 174) est taillée dans une feuille très mince et très légère, en aluminium. Elle se compose de deux secteurs, à coins arrondis, opposés par le sommet, et dont l'angle au centre est droit. Elle est suspendue par deux fils de cocon, dont les extrémités F s'enroulent sur un treuil D (*fig.* 173); on l'introduit dans la boîte formée par les quadrants, de façon que son plan soit horizontal et à égale distance des deux bases de la boîte. — L'aiguille constitue ainsi un conducteur placé à l'intérieur d'un système de deux autres conducteurs, formés par les deux paires de quadrants (a, a') et (b, b').

Tout l'appareil étant primitivement à l'état neutre, l'aiguille doit être disposée de telle façon que les fentes qui séparent les quadrants la divisent en quatre parties identiques; en d'autres termes, les fentes doivent être les bissectrices des angles des deux secteurs.

Les quadrants a et a' sont reliés, par des fils de cuivre couverts de soie, avec une borne métallique isolée A ; les quadrants b et b' sont de même reliés à une borne B, par un autre fil qui ne touche pas le premier. Tout l'appareil est enfermé dans une cage métallique reliée au sol, et qui sert d'écran : on y ménage une fenêtre munie d'une glace, pour permettre le passage des rayons lumineux.

Dans le procédé de mesure le plus habituellement employé, on porte les deux paires de quadrants à des potentiels égaux et de signes contraires $+ V_1$ et $- V_1$, en mettant respectivement en communication les deux bornes A et B avec les deux pôles d'une pile constante, dont l'élément du milieu est relié au sol. — Une troisième borne métallique isolée C communique avec l'aiguille par l'intermédiaire du fil métallique E qui est attaché à cette borne, et du fil métallique G qui est fixé à l'aiguille; ces deux fils plongent dans un cristallisoir H contenant de l'acide sulfurique.

Pour comparer entre eux les potentiels de divers conducteurs, on les met successivement en communication, par un fil métallique long et fin, avec la borne C. De même, pour mesurer le potentiel aux divers points d'un champ, on met en communication avec la borne C une pointe isolée, placée en ces points (175). Selon que le potentiel considéré est positif ou négatif, la charge acquise par l'aiguille est positive ou négative, et par suite l'aiguille est repoussée ou attirée par celui des groupes de secteurs qui est chargé positivement. On mesure la déviation par la méthode de la réflexion (33), au moyen du miroir concave M fixé au fil métallique G solidaire de l'aiguille. Ce fil porte des lames transversales, qui plongent dans l'acide sulfurique et qui servent à amortir les oscillations. L'acide sulfurique sert, en outre, à dessécher l'air de l'appareil. — La théorie montre que, lorsque l'équilibre est établi, la torsion imprimée au système

bifilaire qui supporte la plaque *est proportionnelle à l'angle d'écart, et cet angle est lui-même proportionnel au potentiel* V du conducteur avec lequel l'aiguille est en communication. On a donc $V = A.\alpha$, le coefficient A étant une constante de l'appareil. On pourra prendre, pour rapport des potentiels, le rapport des angles de déviation. — Si l'on connaît la constante A, on obtiendra la valeur des potentiels *en volts*. Avec les modèles courants de cet appareil, on peut facilement mesurer des potentiels de quelques volts seulement.

V. — Capacité électrique. — Condensateurs.

178. ***Notion de capacité électrique.*** — L'expérience a montré (167) que, si la charge d'un conducteur unique isolé devient double, triple, etc., son potentiel devient aussi double, triple, etc., de sa valeur primitive. Représentons par C la charge qu'il faut lui fournir pour faire passer ce conducteur du potentiel zéro au potentiel 1; pour le porter au potentiel 2, il faudra lui fournir 2C; en général, pour le porter au potentiel V, la charge qu'il faudra lui fournir sera égale à $C \times V$; de même, pour le porter d'un potentiel V à un autre potentiel V′, il faudra lui fournir

$$M = C(V' - V).$$

Le nombre qui mesure la charge C nécessaire pour augmenter d'une unité le potentiel du conducteur mesure, *par définition*, ce que l'on appelle *la capacité électrique de ce conducteur.*

179 ***Unité de capacité : farad, microfarad.*** — Il est naturel de prendre, comme unité de capacité, la *capacité d'un conducteur tel que, pour augmenter son potentiel de* 1 *volt, il faille lui fournir une charge de* 1 *coulomb*. Cette unité a reçu le nom de **farad**, en mémoire de Faraday. On aura donc

$$M^{\text{coulombs}} = C^{\text{farads}} \times V^{\text{volts}}.$$

Cette unité de capacité est énorme par rapport à celle des conducteurs que nous manions habituellement; c'est, en effet, la capacité d'une sphère qui aurait $3^2.10^6$ km de rayon. Dans la pratique courante on emploie comme unité de capacité le *microfarad* (μf) qui vaut un millionième de farad; c'est encore la capacité d'une sphère de 9 km de rayon. Nous verrons un peu plus loin comment on peut réaliser des conducteurs ayant une capacité de cet ordre de grandeur.

180. ***La capacité d'un conducteur dépend des conducteurs voisins.*** — La capacité d'un conducteur n'est pas une qualité intrinsèque de ce conducteur; elle dépend bien de sa forme et de ses dimensions, mais elle dépend, en outre, de la proximité plus ou moins grande des conducteurs voisins, de leurs charges, et même

de la nature du diélectrique interposé entre ce conducteur et les conducteurs voisins. C'est ce que les expériences suivantes permettent d'établir :

Un plateau métallique isolé et électrisé A est mis en communication lointaine avec un électromètre à feuilles d'or (*fig.* 175) : la divergence des feuilles indique un certain potentiel V; on approche alors de A un plateau métallique isolé C à l'état neutre, la divergence des feuilles diminue; elle diminue davantage, si l'on met C en com-

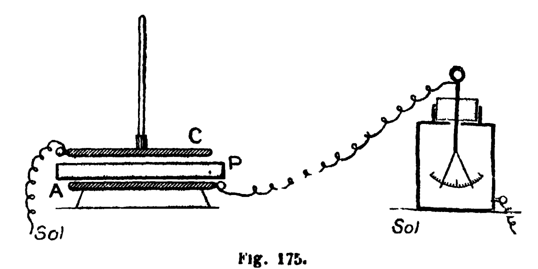


Fig. 175.

munication avec le sol; l'interposition, entre A et C, d'une lame diélectrique solide P, verre ou paraffine, bien neutre, accentue encore la diminution de la divergence. Or, dans ces expériences successives, la charge du plateau A est restée fixe, et son potentiel a diminué; sa capacité a donc augmenté.

Quand nous parlerons de la capacité d'un conducteur, nous supposerons toujours que ce conducteur est à l'intérieur d'un conducteur fermé (les murs de la salle par exemple) et *que tous les conducteurs voisins communiquent avec le sol* (*).

181. ***Capacité électrique d'une sphère***. — Il est nécessaire, dans divers cas, de connaître la capacité électrique d'une sphère; elle peut être déduite d'une expérience simple. Soient deux sphères conductrices isolées, éloignées l'une de l'autre, et éloignées aussi de tout autre conducteur; supposons-les au même potentiel V; si l'on représente leurs capacités par C et C′, leurs charges par M et M′, on aura

$$M = C \times V \quad \text{et} \quad M' = C' \times V :$$

d'où l'on déduit :

$$\frac{M}{M'} = \frac{C}{C'}.$$

(*) En particulier, si un conducteur est à l'air libre, dans un lieu découvert, sa capacité dépend de la répartition des charges électriques qui créent le champ terrestre, répartition qui nous est inconnue, et qui d'ailleurs est variable avec le temps; par suite, la capacité d'un conducteur ne pourra être déterminée que s'il est placé à l'intérieur d'un conducteur creux, d'une salle, par exemple.

Si l'on mesure M et M' au moyen du cylindre de Faraday, on trouve que ces charges sont entre elles comme les rayons R et R' des sphères, c'est-à-dire que l'on a :

$$\frac{M}{M'} = \frac{R}{R'}, \quad \text{par suite} \quad \frac{C}{R} = \frac{C'}{R'},$$

résultat que l'on énonce en disant que *la capacité d'une sphère isolée et éloignée de tout autre conducteur est proportionnelle à son rayon.* On pourra donc écrire, pour une sphère déterminée,

$$C = A.R.$$

Si cette sphère a pour capacité 1 farad, nous avons dit (179) que son rayon vaut $3^2.10^{11}$ cm ; donc

$$A = \frac{1}{3^2.10^{11}}.$$

La capacité en farads d'une sphère de R cm de rayon sera donc :

$$C = R \cdot \frac{1}{3^2.10^{11}},$$

et en microfarads,

$$C = R \, \frac{1}{3^2.10^5}.$$

La Terre, qui a $\frac{4\ 10^9}{2\pi}$ cm de rayon, aurait une capacité de

$$C = \frac{4.10^9}{2\pi} \cdot \frac{1}{3^2\ 10^5} = 708\ \mu f.$$

182 ***Mesure des capacités. — Principe de la méthode.*** — On peut déterminer expérimentalement la capacité C d'un conducteur ; on le charge d'abord à un potentiel V, que l'on détermine comme il a été dit ; puis on le met en communication lointaine avec un conducteur de capacité connue c, préalablement à l'état neutre : la charge primitive CV se répartit alors sur le conducteur de capacité $C + c$, et le porte à un potentiel V_1 que l'on détermine encore par l'expérience. On a :

$$CV = (C + c)V_1, \quad \text{d'où} \quad C = c\frac{V_1}{V - V_1}.$$

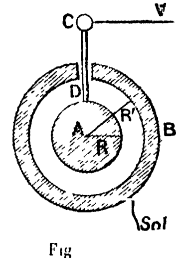
183. ***Condensateur.*** — Soit c la capacité électrique d'un conducteur, *éloigné de tout autre* : quand il est mis en communication avec une *source électrique*, de potentiel V (*), il se met en équilibre de potentiel avec elle, et prend une charge $m = cV$. — Si ce

(*) Une *source électrique* est un conducteur dont une machine électrique maintient le potentiel invariable, quelles que soient les quantités d'électricité qu'on lui enlève

même conducteur, maintenu en communication avec la même source, est placé dans des conditions lui faisant acquérir une capacité plus grande C, il prend une charge plus grande $M = C.V$; c'est ce qu'on exprime en disant qu'il y a *condensation*, c'est-à-dire *accumulation de charge, pour une même valeur du potentiel*; le rapport $\frac{M}{m} = \frac{C}{c}$ s'appelle le *pouvoir condensant*.

On donne le nom de *condensateurs* à des systèmes de conducteurs disposés de manière à accroître considérablement la capacité de l'un d'eux, qui prend le nom de *collecteur*.

184. *Condensateur fermé théorique. — Formule de la capacité.* — La disposition la plus avantageuse, pour un condensateur, est celle où l'un des conducteurs est complètement enveloppé par l'autre : c'est ce qu'on appelle un *condensateur fermé*. Les deux conducteurs prennent les noms d'*armature interne* et *armature externe*. — Tel est le cas théorique d'une sphère conductrice A (*fig.* 176), concentrique avec une enveloppe sphérique conductrice B, de rayon intérieur plus grand que le sien.



Fig

Dans tout condensateur fermé, l'armature interne A étant employée comme collecteur, et l'armature externe B communiquant au sol, la charge de B est rigoureusement *égale et contraire* à celle de A, comme nous l'avons vu dans l'étude des phénomènes d'influence (159).

Dans le cas particulier où l'épaisseur du diélectrique qui sépare les deux surfaces conductrices en regard est *faible* et *uniforme*, le calcul, d'accord avec l'expérience, montre que, pour un condensateur fermé, *la capacité du condensateur*, c'est-à-dire la capacité de l'armature interne, est proportionnelle à la surface S de cette armature et en raison inverse de l'épaisseur ε du diélectrique.

Si le condensateur est à *lame d'air*, sa capacité en *microfarads* est donnée par la formule

$$C = \frac{1}{3^2 . 10^5} \cdot \frac{S}{4 \pi \varepsilon} \text{ microfarads,}$$

où S doit être exprimée en *centimètres carrés* et ε en *centimètres*.

185. *Pouvoir inducteur spécifique.* — L'expérience (180) nous a montré, en outre, que la capacité d'un condensateur dépend de la nature du diélectrique, et qu'on augmente la capacité du collecteur en substituant une lame d'un diélectrique solide ou liquide à une couche d'air de même épaisseur. — C'est dire, en d'autres termes, que la nature du corps isolant joue un rôle essentiel dans la trans-

mission de la force électrique, et que les actions d'influence, ou d'*induction électrique*, ne sont pas de simples actions à distance, indépendantes de la nature du milieu interposé (*).

Si donc l'on substitue à l'air un diélectrique solide ou liquide, il faudra, pour avoir la capacité du condensateur, multiplier l'expression ci-dessus par un coefficient k supérieur à l'unité; ce coeficient s'appelle le *pouvoir inducteur spécifique* ou *constante diélectrique* du diélectrique. La formule suivante,

$$C = \frac{k}{3^2 . 10^5} \cdot \frac{S}{4\pi\varepsilon},$$

représentera donc en microfarads la capacité d'un condensateur fermé, dont la lame diélectrique serait mince et d'épaisseur uniforme.

Voici les valeurs de k pour différents diélectriques :

SOLIDES		LIQUIDES		GAZ	
Caoutchouc	2,2	Alcool	25	*Air* (*étalon*)	1
Gutta-percha	4	Benzine	2,5	Hydrogène	0,9997
Mica	6	Pétrole	2	Vide	0,9994
Paraffine	2,1	Huile d'olive	3		
Verre	7	Vaseline	2,2		

Ces valeurs sont d'ailleurs variables dans d'assez larges limites pour les corps qui n'ont pas une composition chimique déterminée, tels que le verre, le mica, le pétrole (pour le verre, k peut varier entre 5 et 10).

186. ***Condensateurs usuels.*** — On emploie, en pratique, diverses formes de condensateurs; les plus usitées sont la *bouteille de Leyde* et le *condensateur plan*.

1° *Bouteille de Leyde* (**). — Dans ce condensateur, la lame isolante est la paroi d'un flacon de verre mince à large goulot (*fig.* 177). L'armature intérieure est constituée par une feuille d'étain collée sur la surface interne de la bouteille; dans le bouchon, verni à la gomme laque, est fixée une tige de cuivre dont la partie extérieure, souvent recourbée, est terminée par une boule; l'extrémité intérieure porte trois gros fils de cuivre qui viennent toucher l'armature

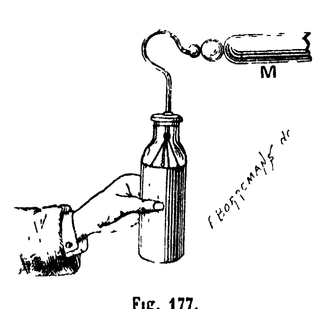


Fig. 177.

(*) Cette propriété très remarquable des diélectriques fut découverte en 1771 par Cavendish; elle tomba dans l'oubli, puis fut retrouvée par Faraday en 1837.

(**) C'est à Leyde, en 1746, que furent observés, pour la première fois, les effets d'un semblable condensateur.

interne. L'armature extérieure est constituée par une feuille d'étain, collée sur la bouteille, jusqu'au voisinage de sa partie supérieure; la partie non couverte est également vernie à la gomme-laque.

Pour charger la bouteille, on la prend ordinairement à la main, par la panse, ce qui met en communication l'armature extérieure avec le sol (*fig.* 177); et l'on fait communiquer la tige avec une machine électrique en activité. — On peut aussi, pour obtenir des charges peu considérables, toucher un certain nombre de fois l'armature intérieure avec le plateau d'un électrophore.

La bouteille de Leyde pouvant être considérée comme un condensateur *fermé*, la charge négative induite sur l'armature extérieure est égale à la charge positive inductrice de l'armature intérieure (159): sa capacité est donnée, sans grande erreur, par l'expression établie plus haut (185).

Une *batterie électrique* (*fig.* 178) est une réunion de grosses bouteilles de Leyde, ou *jarres*, dont on fait communiquer toutes les

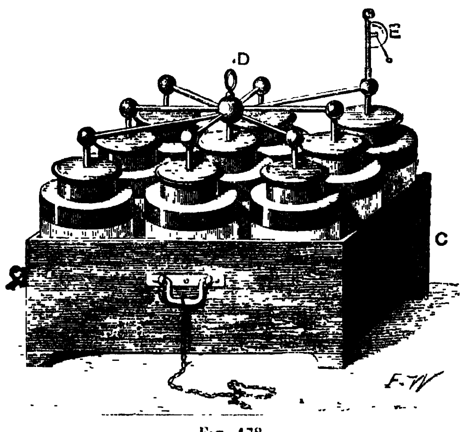


Fig. 178

armatures intérieures par des tiges métalliques qui convergent en D. Elles sont placées dans une caisse de bois C C, dont l'intérieur est garni d'une feuille d'étain, qui met en communication toutes les armatures extérieures et qui communique elle-même avec la poignée métallique A. La capacité d'une batterie est la somme des capacités des jarres qui la constituent (*).

(*) La capacité des batteries de 9 éléments que l'on trouve habituellement dans les collections ne dépasse guère $\frac{1}{50}$ de microfarad, elle dépend d'ailleurs beaucoup de la qualité du verre employé.

Pour charger la batterie, on met l'anneau D en communication avec le pôle positif d'une machine électrique, l'autre pôle et la poignée A en communication avec le sol par une chaîne métallique. Un électromètre de Henley (*), placé en E, permet de se rendre compte des progrès que fait la charge.

2° *Condensateur plan.* — C'est la forme la plus facile à réaliser. Sur les deux faces d'un carreau de vitre, on colle deux feuilles d'étain en laissant autour de chaque feuille une marge de verre, de quelques centimètres, que l'on vernit à la gomme laque pour assurer l'isolement : c'est le *carreau de Franklin.* — L'ensemble des deux plateaux et de la lame isolante de la figure 175 constitue aussi un condensateur plan.

La capacité d'un pareil condensateur est encore donnée très approximativement par la formule générale des condensateurs fermés, à condition que l'épaisseur du diélectrique soit constante et très petite par rapport aux autres dimensions du condensateur ; en réduisant l'épaisseur de la lame, on finit par avoir une capacité notable par unité de surface.

C'est en formant une véritable *batterie* de condensateurs plans, que l'on réalise des capacités de l'ordre du microfarad, et en particulier que l'on construit des *condensateurs étalons* ayant exactement une capacité d'un microfarad. Le meilleur dispositif consiste à employer des lames de mica obtenues par clivage, et ayant une épaisseur au plus égale à $\frac{1}{10}$ de millimètre; on les argente sur les deux faces (**), et on les empile les unes sur les autres comme les feuillets d'un livre. — On obtient ainsi une pile de lames isolantes *a*, *a*... séparées par des feuilles métalliques conductrices *f*, *f*... (*fig.* 179). Toutes les feuilles métalliques d'ordre pair communiquent ensemble avec une borne B; celles d'ordre impair sont également mises en communication entre elles et réunies à une autre borne A; la capacité totale est la somme des capacités des éléments du condensateur. Les deux bornes sont placées sur la



Fig. 179.

(*) Ce petit appareil n'est autre chose qu'un pendule électrique non isolé, dont on peut évaluer l'écart de la verticale sur un cadran divisé; cet écart dépend uniquement du potentiel auquel l'appareil est porté.

(**) Cette argenture se fait par un procédé chimique; la couche d'argent déposée est très mince (de l'ordre du centième de millimètre); avec de l'acide azotique, on enlève l'argent sur les bords de chaque lame, on lave, on sèche et on vernit les bords à la gomme laque.

boîte isolante qui contient le condensateur. — Pour charger un tel condensateur, on mettra l'une des bornes au sol et l'autre en communication avec une source à potentiel constant.

Application. — Proposons-nous, comme application, de résoudre le problème suivant :

On veut construire un microfarad comprenant 200 *lames carrées de mica argenté ayant* 0,01 *cm. d'épaisseur. Quelles dimensions faut-il donner à chaque lame? On suppose que le pouvoir inducteur spécifique du mica employé est égal à* 6.

Il suffit d'appliquer la formule qui donne la capacité d'un condensateur plan.

$$C = 1\,\mu f = \frac{6}{3^2 . 10^5} . \frac{a^2 . 200}{4\pi . 0{,}01},$$

on en déduit :

$$a^2 = 30 . \pi \, cm^2,$$

d'où :

$$a = 9{,}7 \text{ cm}.$$

On voit que ce condensateur occupera un faible volume, puisque son épaisseur sera de 2 centimètres.

187. *Énergie d'un condensateur chargé.* — La charge de l'armature interne au potentiel V est donnée par la formule générale (179) :

$$M = CV.$$

C'est aussi la valeur absolue de la charge négative de l'autre armature, qui est au potentiel zéro, puisqu'elle communique avec le sol.

Quant à l'énergie du condensateur, elle est égale à la somme des énergies des deux armatures. Or, l'énergie de l'armature interne est donnée par (173) :

$$W = \frac{1}{2} MV;$$

celle de l'autre armature est nulle, puisque cette armature est au potentiel zéro; par suite l'énergie totale sera :

$$W = \frac{1}{2} MV,$$

ou encore :

$$W = \frac{1}{2} CV^2,$$

formule dans laquelle W sera exprimé en joules, si C est exprimé en farads et V en volts.

Calculons l'énergie d'une batterie de 0,1 microfarad de capacité et chargée à un potentiel de 25 000 volts (*). On aura :

$$W = \frac{1}{2} \cdot 0{,}1 \cdot \frac{1}{10^6} \cdot (25000)^2 = 31{,}25 \text{ joules};$$

ou environ 3,2 kilogrammètres. — Cette énergie n'est pas très grande; cela tient à ce que la charge utilisée est faible, 0,0025 coulomb.

188. ***Rigidité électrostatique.*** — On pourrait être tenté, pour augmenter l'énergie du condensateur, de réduire l'épaisseur du diélectrique afin d'augmenter la capacité du condensateur. Mais on se trouve alors en présence d'une difficulté particulière : si, pour une valeur donnée du potentiel, l'épaisseur descend au-dessous d'une certaine limite, le diélectrique est percé par une étincelle, et le condensateur est hors d'usage. Il est utile de connaître, pour les différents diélectriques employés industriellement, la différence de potentiel nécessaire pour produire cet effet, ou, en d'autres termes, ce qu'on appelle leur *rigidité électrostatique*; l'expression habituelle de cette quantité s'obtient en faisant le quotient de la différence de potentiel qui détermine la rupture (évaluée en kilovolts), par l'épaisseur évaluée en centimètres (**); elle dépend de la nature du diélectrique et de son épaisseur.

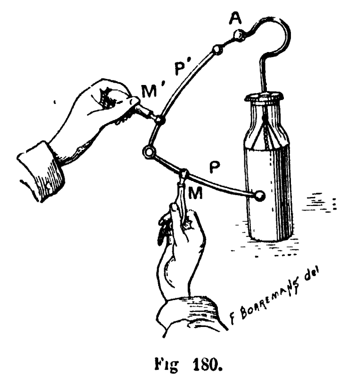


Fig 180.

189. ***Décharge du condensateur.*** — Pour ramener un condensateur à l'état neutre, le seul procédé employé en pratique est la *décharge brusque*, qui s'obtient en établissant une communication, par un conducteur, entre les deux armatures d'un condensateur chargé. C'est ce qu'on peut faire en appliquant une main sur l'une des armatures, et venant toucher l'autre armature avec l'autre main;

(*) Ce potentiel correspond à peu près à une étincelle d'un centimètre dans l'air.

(**) Des mesures qui ne sont pas très précises, à cause de leur difficulté, ont montré que, pour percer une lame de verre à vitres de 1 millimètre d'épaisseur, il faut une différence de potentiel d'à peu près 16 kilovolts, ce qui fait une *rigidité électrostatique* de 160 kilovolts par centimètre. On voit donc qu'il sera prudent de ne pas charger les jarres des batteries (186) à un potentiel trop élevé. Les modèles usuels supportent avec peine une différence de potentiel de 25 kilovolts.

La valeur de la *rigidité électrostatique* du mica présente également de l'intérêt, étant donné l'emploi de cette substance dans la construction des condensateurs étalons; sous une épaisseur de 0,01 cm, il faut 11,5 kilovolts pour déterminer la rupture, ce qui fait une *rigidité* de 1150 kilovolts par centimètre.

mais la décharge, se faisant à travers le corps humain, produit une commotion qui est souvent pénible. — On préfère se servir d'un *excitateur* (*fig.* 180), formé de deux arcs métalliques P, P′ articulés à charnière, et dont les extrémités libres sont terminées par des boules; quand on veut opérer sur des condensateurs fortement chargés, on isole les arcs métalliques par des manches de verre M, M′. On met l'une des boules en contact avec l'armature au potentiel zéro et l'on approche l'autre boule de l'autre armature : lorsque la distance est suffisamment faible, une étincelle sonore et brillante éclate entre cette boule et la seconde armature.

190. ***Charges résiduelles.*** — Un condensateur à lame diélectrique solide n'est jamais ramené à l'état neutre après une seule décharge; quelques minutes après, on peut encore obtenir une deuxième étincelle, moins forte que la première, et accusant sur le condensateur un *résidu* d'électricité — Après la deuxième étincelle, on observe encore une charge résiduelle, qui permet d'obtenir, au

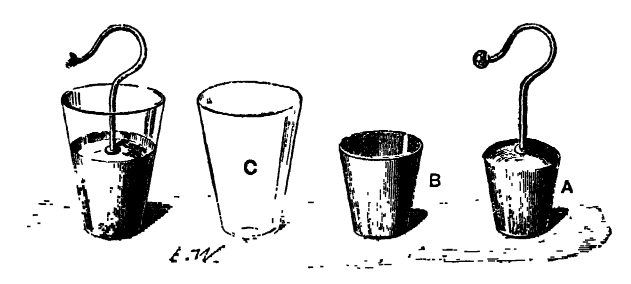


Fig. 181.

bout de quelques instants, une troisième étincelle, et ainsi de suite.

Ces charges *résiduelles* semblent dues, comme on va le voir, à la pénétration progressive de l'électricité *dans la lame isolante.* Il ne reste sur les armatures que des charges très faibles; la majeure partie de l'électricité quitte les armatures pour aller imprégner les faces de la lame diélectrique. — Pour le montrer, on peut employer une bouteille de Leyde (*fig.* 181) dont les armatures A et B sont formées par des pièces métalliques, pouvant se détacher du bocal de verre intermédiaire C. On charge cette bouteille, et on la place sur un support isolant; on enlève avec la main l'armature intérieure, ce qui conduit son électricité dans le sol; on retire ensuite le vase de verre C, et l'on met l'armature extérieure B en communication avec le sol. Si l'on recompose alors la bouteille, on peut encore obtenir une décharge très énergique. Cette expérience est due à Franklin.

191. ***Théorie de l'électroscope à feuilles d'or.*** — Nous pouvons maintenant nous rendre compte du fonctionnement de l'électroscope à feuilles d'or. C'est en réalité un condensateur fermé, dont l'armature externe est constituée par la cage métallique, et l'armature interne par les feuilles d'or et la portion de la tige qui est à l'intérieur de la cage. La capacité de l'électroscope étant faible, la charge qu'il prend ne modifie pas sensiblement le potentiel du corps avec lequel on le met en communication lointaine; cette charge ne dépend d'ailleurs que de la différence de potentiel entre les feuilles et la cage; il en résulte que la répulsion mutuelle des feuilles d'or, et l'attraction qu'elles subissent de la part des parois de la cage, ne dépendront également que de cette différence de potentiel; il en sera donc de même de leur divergence. Ce fait peut être vérifié par une expérience simple : l'électroscope étant isolé sur une plaque de paraffine PP′ (*fig.* 182), on réunit par un fil de cuivre *a* la cage et la boule, puis on porte le tout à un potentiel V : les feuilles ne divergent pas; avec un crochet isolant, on supprime les communications A et *a* : les feuilles restent verticales. Si alors on met la cage au sol, ce qui établit une différence de potentiel entre les feuilles et la cage, les feuilles divergent immédiatement.

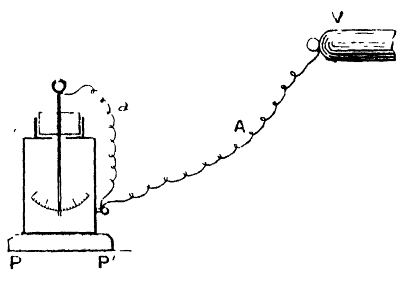


Fig 182.

Elles divergeraient de même, si, la cage restant isolée, on mettait la boule en communication avec le sol.

On voit ainsi la nécessité d'employer des électroscopes à *cage métallique*; la cage de verre des anciens électroscopes ne peut servir d'écran et protéger les feuilles d'or contre l'induction des charges extérieures. Il peut même arriver, dans ce cas, que des charges se développent sur la cage même, s'y localisent et viennent troubler les indications de l'appareil; la capacité de l'électromètre dépendra alors en effet de ces charges et de leur répartition, qui pourrait d'ailleurs varier d'une expérience à l'autre. Dès lors, à un même potentiel, correspondraient, pour l'électromètre, des charges et par suite des divergences différentes : l'instrument ne serait pas comparable à lui-même.

Remarque. — Il ressort de ces considérations que, pour mesurer une différence de potentiel avec un électromètre à feuilles d'or, on portera les feuilles à un de ces potentiels, et là *cage isolée* à

l'autre : la différence de potentiel se déduira de la divergence mesurée (*).

192. ***Électroscope condensateur de Volta.*** — L'*électroscope condensateur*, qui est dû à Volta, n'est autre chose qu'un électroscope à feuilles d'or dont la tige est munie d'un condensateur. La tige porte, en effet, un plateau en cuivre A (*fig.* 183), dont la face *supérieure* est couverte d'une couche mince de vernis à la gomme laque; sur ce plateau, on en place un second, B, aussi en cuivre, dont la face *inférieure* est également couverte de vernis : le système constitue un condensateur, dont le diélectrique est représenté par les deux couches de vernis(**). — Chargeons ce condensateur avec l'une de ces sources qui fournissent de l'électricité à un potentiel très faible, mais qui reproduisent instantanément l'électricité qu'on leur emprunte (sources voltaïques, 251) : mettons le plateau B en communication avec le sol, et le plateau A avec l'un des pôles de la source, dont le potentiel est v. Soit c la capacité électrique qu'aurait le plateau A loin de tout conducteur. Dans les conditions actuelles, le plateau B communiquant au sol, et le diélectrique solide interposé ayant une épaisseur très petite, la capacité C du plateau A est beaucoup plus grande que c (183)(***) : il acquiert une charge $M = C.v$; mais, son potentiel étant toujours v, la divergence des feuilles est à peu près insensible. Supprimons alors la com-

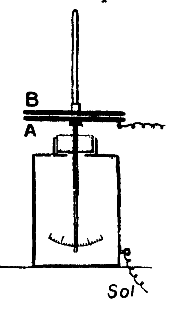


Fig. 183.

(*) La divergence des feuilles n'est pas proportionnelle à la différence de potentiel qui la produit. Si l'on suppose négligeable la variation de capacité que le changement de forme, provenant de la divergence, détermine sur l'électroscope, on voit facilement que *la force répulsive* qui s'exerce entre les feuilles *est proportionnelle au carré de la différence de potentiel* $V_2 - V_1$ *qui existe entre les feuilles et la cage*. En effet, si cette différence devient double, la charge $M = C(V_2 - V_1)$ de l'électromètre double également; la densité en chaque point des feuilles double donc, et, comme la pression électrostatique, qui pousse les feuilles vers les parois de la cage, est proportionnelle au carré de la densité (154), la résultante de ces pressions sera elle-même proportionnelle au carré de la densité, c'est-à-dire au carré de la différence de potentiel $V_2 - V_1$.

Ce raisonnement s'applique *rigoureusement* à l'électromètre à quadrants.

(**) C'est à cause des phénomènes de pénétration des charges que chaque plateau doit garder avec soi *la moitié* de la lame diélectrique du condensateur; les charges adhérentes au diélectrique restent bien ainsi sur leurs plateaux respectifs.

(***) Si d est le diamètre des plateaux, et qu'on néglige leur épaisseur et la capacité des feuilles d'or, qui est très petite, le calcul montre que $c = \frac{d}{\pi}$; d'autre part $C = \frac{kS}{4\pi\varepsilon}$; or $k = 3$ pour la gomme laque; en prenant $\varepsilon = 0{,}02$ cm pour l'épaisseur de la double couche de vernis et $d = 15$ cm, on trouve $\frac{C}{c} = 440$ à peu près.

munication avec le sol et avec la source, et éloignons le plateau B, en l'enlevant par son manche de verre. La capacité du plateau A retombant alors à la valeur c, sa charge M le porte à un potentiel V, tel que l'on ait $M = c.V$. Pour obtenir la valeur de V, égalons ces deux expressions de M : il vient $c.V = C.v$, d'où $V = v \cdot \frac{C}{c} \cdot$ Ce potentiel V est donc beaucoup plus grand que v : dans la plupart des cas, la divergence des feuilles est alors très grande. — Pour reconnaître la nature de la charge de l'instrument, il suffit d'en approcher alors un corps chargé d'une électricité connue, comme on le fait avec un électroscope ordinaire (163).

VI. — Machines électrostatiques.

193. ***Principe des machines électrostatiques.*** — On appelle *sources électriques* ou *générateurs électriques*, ou encore *électromoteurs* des machines capables d'établir et de maintenir entre un conducteur et le sol, ou plus généralement entre deux conducteurs qu'on appelle les *pôles* de la machine, une différence de potentiel constante.

Ces machines utilisent soit du travail mécanique, soit de l'énergie chimique, pour augmenter l'énergie électrique d'un conducteur déterminé ; ce sont donc, comme toutes les machines, des *transformateurs* d'énergie. — Elles comprennent diverses catégories : les machines *dynamo-électriques*, les *piles*, que nous étudierons plus loin, et les machines *électrostatiques*, dont nous allons dire quelques mots.

Pour comprendre le principe de ces machines, imaginons que, dans un conducteur creux et isolé C (*fig.* 184), on porte un corps électrisé A, tel que le plateau d'un petit électrophore, et que l'on opère le contact; la charge de A passe intégralement sur la surface extérieure de C, quelle que soit celle qui s'y trouve déjà. On peut d'ailleurs répéter l'opération autant de fois que l'on voudra : on accroîtra ainsi la charge de C, et, par suite, son potentiel, et aussi son énergie.

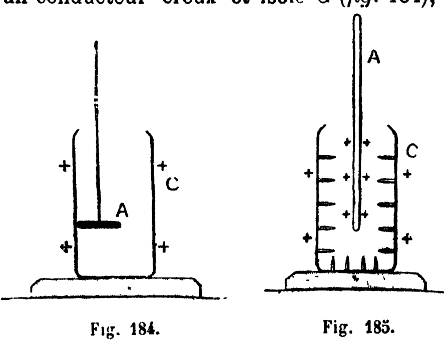


Fig. 184. Fig. 185.

Nous avons supposé A conducteur; s'il est isolant, le contact ne

suffit plus pour faire passer sa charge sur C. On tourne la difficulté en armant de pointes aiguës la surface intérieure du conducteur creux (*fig.* 185). Le corps A (un bâton de verre, par exemple) étant chargé positivement, la charge négative produite par influence sur la surface intérieure de C ne peut y rester ; elle s'échappe par les pointes, et vient neutraliser A ; le conducteur creux reste donc encore chargé d'une quantité d'électricité positive égale à celle de A.

On voit qu'une telle machine se compose essentiellement d'un organe *producteur* d'électricité, qui sert à charger un deuxième organe, le *transporteur* (A) ; celui-ci cède ensuite son électricité au *collecteur* (C).

Suivant que le *producteur* électrise le *transporteur* par frottement ou par influence, la machine est appelée *machine à frottement*, ou *machine à influence.*

On a construit différents modèles de machines *à frottement*, depuis la boule de soufre d'Otto de Guéricke (vers 1670), jusqu'à la machine de Ramsden (1766) et à celle de Nairne (1772), qui sont parmi les plus récentes ; elles ne présentent plus qu'un intérêt historique. Nous nous bornerons à dire quelques mots des machines *à influence*, les seules utilisées aujourd'hui.

Les applications de toutes ces machines sont d'ailleurs des plus restreintes ; en dehors de leur emploi dans les Cours, pour charger des batteries (et, dans ce cas, la bobine de Ruhmkorff les remplace avec avantage), on les utilise d'une façon plus ou moins rationnelle dans le traitement de certaines maladies ; elles n'ont reçu aucune application industrielle.

194. ***Machines à influence.*** — Si le *producteur* possède une charge fixe, et que, à chaque opération, on électrise le transporteur de la même manière, la charge du *collecteur* croîtra comme les termes d'une progression arithmétique ; on dit alors que la machine fonctionne par *addition.* L'électrophore, auquel on adjoindrait un conducteur creux de forme convenable, rentrerait dans cette catégorie. — Si, au contraire, par le jeu même de la machine, la charge du producteur va progressivement en croissant, la quantité d'électricité portée sur le collecteur, à chaque opération, devient de plus en plus grande : la machine fonctionne alors par *multiplication.*

Replenisher. — C'est exactement le cas du *replenisher*, petite machine électrique très simple, imaginée par Lord Kelvin pour maintenir à un potentiel déterminé et constant un plateau d'un électromètre particulier, destiné à mesurer des différences de potentiel. — Les organes de cet appareil sont représentés en vraie grandeur par la figure 186 ; la figure 187 en représente une coupe horizontale à une échelle un peu plus grande. Il est formé de deux portions de cylindre A et B, métalliques, ayant même axe ; ces

deux conducteurs isolés sont munis l'un et l'autre, dans leur partie concave, de deux lames de ressort *a* et *b*, placées aux extrémités d'un même diamètre du cylindre. Deux autres ressorts *c* et *d* sont placés près des fentes qui séparent A et B, également aux extrémités d'un même diamètre *c* étant plus près de A, et *d* plus près

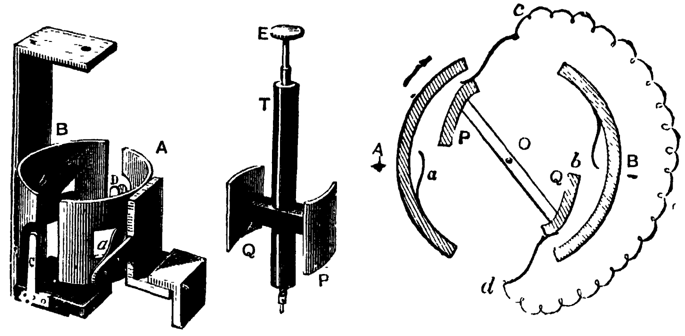


Fig. 186. Fig. 187.

de B; ces deux ressorts communiquent métalliquement entre eux. Deux pièces métalliques P et Q, légèrement courbes et réunies par une tige d'ébonite, peuvent recevoir un mouvement de rotation autour de l'axe O du cylindre. — Supposons que A ait été électrisé positivement, et que le mouvement de la pièce mobile ait lieu dans le sens de la flèche : la pièce P arrive en contact avec le ressort *c*, en même temps que Q touche le ressort *d*. Le conducteur P*cd*Q, ainsi constitué par le contact, s'électrise par influence, négativement en P au voisinage de A, et positivement en Q à la partie la plus éloignée de A. Le mouvement de rotation continuant, la pièce P, électrisée négativement, quitte le ressort *c* et vient toucher le ressort *b*, en même temps que Q, électrisé positivement, touche le ressort *a*; les plaques P et Q, qui se trouvent alors à l'intérieur des demi-cylindres A et B, perdent leurs électricités, qui se répandent sur les faces externes de A et B; la charge positive de A se trouve ainsi augmentée, et B a été chargé négativement. Quand on continue à tourner dans le même sens, les mêmes phénomènes d'influence se reproduisent, et les charges de A et de B vont en augmentant. Si, à un moment donné, on change le sens de la rotation, on voit que les charges de A et de B iront au contraire en diminuant.

Si l'on suppose que les conducteurs A et B possèdent à l'origine des charges $+ q$ et $- q$, d'ailleurs aussi petites que l'on voudra, on établit sans peine que, par le jeu de la machine, ces charges

croissent comme les termes d'une progression géométrique. — En pratique, A et B n'étant jamais rigoureusement au même potentiel, la machine s'amorce d'elle-même.

On a appliqué cette machine dans un allumoir électrique pour le gaz.

Machine de Wimshurst. — La machine de Wimshurst, une des plus répandues aujourd'hui, est fondée sur les mêmes principes.

Elle se compose de deux plateaux de verre identiques A, B (*fig.* 188), que l'on fait tourner simultanément en sens inverse

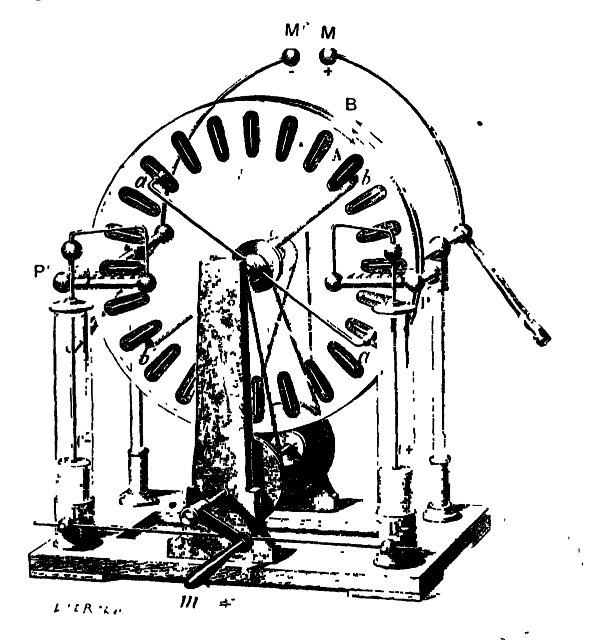


Fig. 188.

autour du même axe, au moyen de la manivelle *m* et de deux cordes sans fin, dont l'une est croisée. En avant du plateau antérieur A est disposé un conducteur *aa'*, muni à ses deux extrémités de petits balais métalliques qui frottent contre des bandes d'étain, collées sur le plateau A et gaufrées en relief. En arrière du plateau postérieur B est disposé un conducteur semblable *bb'*, muni de balais qui frottent contre des bandes d'étain collées sur ce plateau. Les conducteurs *aa'* et *bb'* sont disposés symétriquement par rapport à

un plan vertical passant par l'axe de rotation : ils font entre eux un angle d'environ 60°. Deux peignes métalliques P et P' embrassent les plateaux suivant leur diamètre horizontal et communiquent avec les armatures intérieures C et C' de deux bouteilles de Leyde, dont les armatures extérieures D et D' communiquent entre elles et avec le sol; on réalise ainsi des collecteurs de grande capacité sous un faible volume. Enfin deux tiges métalliques, terminées par des boules M et M', communiquent respectivement avec les peignes P et P', et peuvent être à volonté éloignées ou rapprochées l'une de l'autre.

Les deux boules M et M' étant au contact, on met les plateaux en mouvement; supposons qu'une au moins des bandes d'étain soit électrisée; au moment où cette bande passe en face des balais du conducteur diamétral de l'autre plateau; la bande d'étain de ce plateau qui touche le balai est soumise à l'influence du secteur électrisé qui passe en face; les deux secteurs intéressés jouent alors à peu près le rôle des transporteurs P et Q du replenisher. Peu à peu tous les secteurs s'électrisent, cèdent, en passant, leur électricité aux peignes, et se chargent même d'électricité contraire; au bout de quelques instants, on entend un bruissement particulier, indiquant que la machine fonctionne. Si l'on écarte alors les boules M et M', on obtient de fortes étincelles, jaillissant à des intervalles rapprochés, chaque fois que les conducteurs C, C' arrivent à leur limite de charge (195).

Nous avons supposé qu'on avait communiqué, à l'origine, une charge très faible à l'une des bandes d'étain. En réalité, la machine, une fois qu'elle a fonctionné, reste à peu près indéfiniment amorcée, l'un au moins des secteurs n'étant pas au même potentiel que les autres.

195. ***Limite de charge. — Voltage.*** — A mesure que l'on fait fonctionner une machine, la charge du collecteur augmente et, *théoriquement, cette charge peut augmenter indéfiniment.* Toutefois, en pratique, des étincelles finiront par jaillir entre les pôles M et M' (*fig.* 202) de la machine, quand leur différence de potentiel aura atteint une valeur déterminée, qui ne dépend que de leur distance; cette distance est d'ailleurs variable avec les circonstances extérieures, et est d'autant plus faible que l'isolement laisse plus à désirer. Il peut même arriver que, par un temps très humide, les plateaux et les pieds de verre se couvrent de rosée et qu'on éprouve alors quelque difficulté à amorcer la machine.

Quoi qu'il en soit, pour des conditions données, la machine peut établir et maintenir entre ses pôles une différence de potentiel déterminée; elle constitue donc une *source* d'électricité. On appelle *voltage* de la machine, cette différence de potentiel. Une bonne ma-

chine de Wimshurst, de modèle courant, peut, par un temps sec, avoir un voltage de 100 000 volts, ce qui correspond à des étincelles d'au moins 15 cm entre les pôles.

196. ***Débit et puissance d'une machine.*** — On appelle *débit* d'une machine électrostatique, la quantité d'électricité qu'elle peut fournir par unité de temps, c'est-à-dire par seconde. Dans les machines électrostatiques, en général, le débit, qui est proportionnel à la vitesse de rotation des plateaux, est toujours extrêmement faible, et malgré le haut voltage de la machine, sa *puissance* (*) est si petite que ces machines ne sont d'aucune utilité au point de vue industriel. — On peut se faire une idée de cette puissance en mesurant le temps nécessaire pour charger à un potentiel donné une batterie de capacité connue. Supposons qu'il ait fallu 20 secondes pour charger à 25 000 volts (**) une batterie d'un dixième de microfarad de capacité. La charge fournie sera :

$$M = (0{,}1.10^{-6}) \times 25\,000 = 0{,}0025 \text{ coulomb},$$

et le travail fourni, $\frac{1}{2}$ MV (187) aura pour expression :

$$W = \frac{1}{2} \times 0{,}0025 \times 25\,000 = 31 \text{ joules, à peu près.}$$

Le travail fourni par seconde, c'est-à-dire la *puissance* de la machine, sera :

$$P = \frac{31}{20} = 1{,}5 \text{ watt} (^{***}),$$

ce qui équivaut à environ $\frac{2}{13}$ de kilogrammètre par seconde ou $\frac{2}{13 \times 75}$, c'est-à-dire $\frac{1}{500}$ de cheval-vapeur.

VII. — Effets de la décharge électrique.

197. ***Transformations diverses de l'énergie électrique d'une décharge.*** — Suivant les corps à travers lesquels se produit la

(*) Nous rappelons que la puissance d'une machine est le travail qu'elle peut fournir par unité de temps (Cours de Seconde C et D, 4e éd., page 10).

(**) Ce potentiel correspond à 1 centimètre d'étincelle dans l'air.

(***) Le watt est la puissance d'une machine qui fournit *un joule par seconde*; il vaut donc $\frac{1}{9{,}81}$ kilogrammètre par seconde, ou, en chevaux-vapeur, $\frac{1}{9{,}81 \times 75}$, c'est-à-dire $\frac{1}{736}$ de cheval-vapeur.

décharge, énergie mise en jeu peut apparaître sous des formes différentes, et donner lieu à des manifestations *calorifiques*, *lumineuses*, *mécaniques*, *chimiques* et même *physiologiques*; examinons ces diverses manifestations.

198. ***Effets lumineux. — Étincelle. — Distance explosive de l'étincelle.*** — Nous avons déjà dit à plusieurs reprises que, si l'on amène un conducteur communiquant avec le sol jusqu'au contact d'un autre conducteur contenant une charge M à un certain potentiel V, ce dernier se décharge et revient au potentiel zéro, en restituant une énergie $\frac{1}{2}$ MV.

Un peu avant le contact, on voit, en général, entre les deux conducteurs, jaillir une *étincelle*, sous la forme d'un trait de feu plus ou moins brillant; l'étincelle est accompagnée d'un bruit sec plus ou moins fort. La distance à laquelle se produit cette étincelle dépend de la différence de potentiel des conducteurs, et de la nature du diélectrique interposé (188); si le milieu est gazeux. elle dépend, en outre, dans une large mesure, de la pression du gaz. Dans l'air à la pression ordinaire, la distance explosive dépend uniquement de la différence de potentiel et peut même la caractériser; aussi les potentiels élevés étant très difficiles à mesurer en volts, on se borne souvent à indiquer la distance explosive qui leur correspond dans l'air à la pression ordinaire (*). — A une différence de potentiel de 5000 volts, correspond à peu près une distance explosive de 1 millimètre; à 25 000 volts, 1 cm; à 100 000 volts, 15 cm. — La longueur de l'étincelle semble donc croître plus vite que la différence de potentiel, et l'on peut penser que les éclairs, qui sont des étincelles atteignant parfois plusieurs milliers de mètres, ne correspondent pas à des différences de potentiel, entre les nuages et le sol, beaucoup plus grandes que celles que nous savons produire.

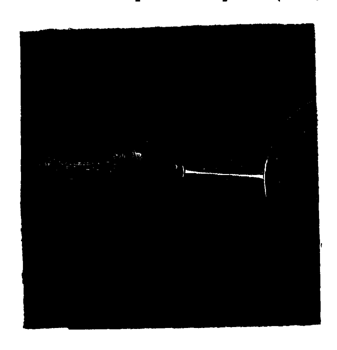


Fig. 189.

L'étincelle peut d'ailleurs beaucoup varier d'aspect; quand elle est courte (jusqu'à 3 ou 4 cm) elle est rectiligne (*fig.* 189); plus longue, elle devient sinueuse (*fig.* 190 et 191); parfois même elle

(*) La distance explosive dépend encore un peu de la forme des surfaces entre lesquelles jaillit l'étincelle, elle n'est pas tout à fait la même quand l'étincelle jaillit entre deux sphères égales, ou entre une pointe mousse et un plan, par exemple.

présente des ramifications (*). Elle est d'autant plus éclatante et d'autant plus bruyante que la décharge met en jeu une plus

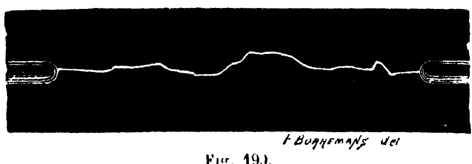


Fig. 190.

grande quantité d'électricité; la figure 192 est la reproduction photographique en demi-grandeur de l'étincelle de décharge

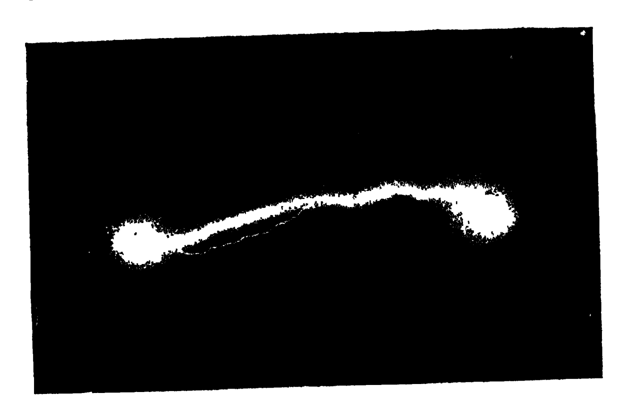


Fig. 191.

d'une grosse bouteille de Leyde. — La décharge est, dans tous les cas, extrêmement rapide (une petite fraction de seconde) (**).

Si le conducteur à bas potentiel vers lequel se fait la décharge s'éloigne trop, la décharge devient moins bruyante; au lieu de produire une explosion, elle donne lieu

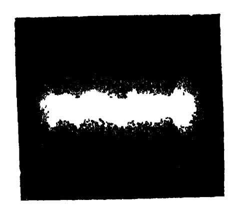
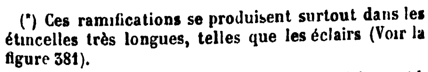


Fig. 192.



(*) Ces ramifications se produisent surtout dans les étincelles très longues, telles que les éclairs (Voir la figure 381).

(**) Quand une étincelle jaillit, dans l'obscurité, entre les deux pôles d'une machine de Wimshurst, les bandes d'étain, subitement éclairées, paraissent immobiles, bien qu'elles soient animées d'une vitesse assez grande (environ 10 mètres par seconde) : la rotation pourrait être dix fois plus rapide, qu'elles sembleraient encore immobiles.

à un bruissement particulier. Elle se présente alors, au pôle positif de la machine, sous la forme d'une aigrette violette très pâle, formée d'un pédicule assez brillant portant un grand nombre de fines ramifications (*fig.* 193) (*) : le pôle négatif offre un aspect différent; il est entouré d'une sorte de gaine violette et s'il présente une pointe, il s'y trouve une petite étoile brillante. La forme de l'aigrette dépend donc du signe de l'électricité qui s'échappe.

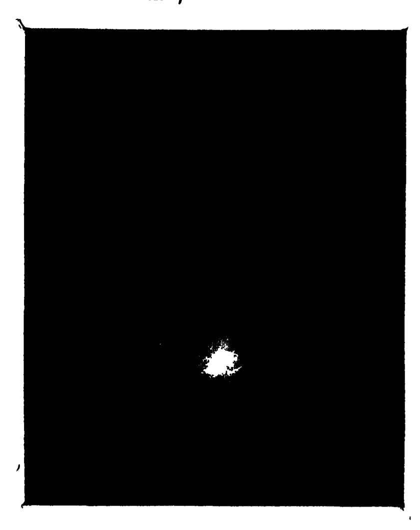


Fig. 193.

Si les deux conducteurs C et C′ (*fig.* 194) sont recouverts d'une lame diélectrique solide P, P′, ayant une *rigidité électrostatique* (188) suffisante pour qu'elle ne soit pas percée, on observe entre les deux surfaces isolantes en regard, quand la différence de potentiel entre les deux lames conductrices devient assez grande, une lueur violette très pâle et silencieuse. On a donné le nom *d'effluve* à cette forme de la décharge (**).

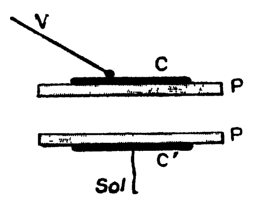


Fig. 194.

La décharge dans les gaz raréfiés donne lieu à des phénomènes extrêmement curieux, sur lesquels nous aurons à revenir plus tard.

199. ***Effets mécaniques.*** — Lorsqu'une décharge traverse un corps *solide*, *mauvais conducteur*, elle produit un choc violent dans les points qu'elle traverse : le corps est alors généralement percé ou brisé. — C'est ainsi qu'une carte, ou une mince lame de mica ou de verre, placée

(*) La figure 193 est la reproduction d'une photographie obtenue en posant simplement, pendant un temps très court, une plaque au gélatino-bromure sur l'extrémité d'une tige métallique d'où s'échappait une aigrette positive; l'image de l'étincelle de la figure 191 a été obtenue par un procédé analogue : on a fait jaillir l'étincelle entre deux petites boules métalliques posées sur une plaque photographique ordinaire.

(**) C'est sous l'influence de cet effluve que l'on peut produire certaines réactions chimiques (préparation de l'ozone, etc.).

entre les deux boules d'une machine de Wimshurst en activité, est immédiatement percée. En déplaçant la carte, on la crible de trous en quelques instants.

De même, si l'on place, entre les extrémités de deux tiges métalliques, un morceau de bois bien sec, et qu'on le fasse traverser par la décharge d'une batterie fortement chargée, on voit le bois se fendre et même parfois se briser en éclats. C'est un effet semblable à celui que produit la foudre sur les troncs d'arbres qu'elle frappe.

200. ***Effets calorifiques.*** — L'étincelle de la machine électrique produit un dégagement de chaleur dans l'air qu'elle traverse; c'est ce dégagement de chaleur qui rend l'air incandescent et donne lieu aux phénomènes lumineux de la décharge. — Par exemple, si l'on prend une bouteille de Leyde chargée, et si l'on applique une couche de coton-poudre, imprégnée de poussière de résine, sur la boule de l'excitateur qui sert à produire la décharge, on voit le coton-poudre prendre feu.

Lorsque l'étincelle électrique traverse un mélange d'hydrogène et d'oxygène, la chaleur développée par la décharge détermine la combinaison de ces deux gaz et la formation d'eau. — C'est ce qu'on réalise, en Chimie, dans les analyses eudiométriques de gaz combustibles hydrogénés.

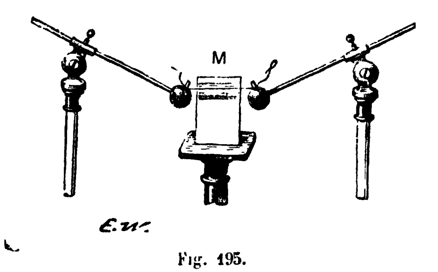


Fig. 195.

Enfin, si l'on opère avec une *batterie*, et qu'on en fasse passer la décharge au travers d'un fil métallique, on arrive, selon le degré de finesse du fil, à le faire rougir, à le fondre, ou même à le volatiliser. — On emploie, pour ces expériences, un appareil désigné sous le nom d'*excitateur universel*, qui se compose de deux tiges métalliques supportées par des pieds de verre, et terminées par des boules (*fig.* 195). On tend entre les deux boules un fil de platine fin; au moment où l'on fait communiquer les tiges avec les armatures d'une batterie chargée, on voit le fil rougir, et souvent même se fondre. — Si on le remplace par un fil de soie simplement *doré* à sa surface, la décharge laisse le fil de soie intact, et passe tout entière par la mince couche d'or : l'or est réduit en vapeur, et vient se déposer, en une poussière noirâtre, sur une feuille de carton placée derrière (*fig.* 195).

Si le fil métallique est plongé dans l'eau, il est également volatilisé; la formation et la condensation brusques de la vapeur produisent

sur le liquide un choc qui se transmet au vase, et le brise souvent : c'est l'expérience de la *torpille électrique* (*fig.* 196).

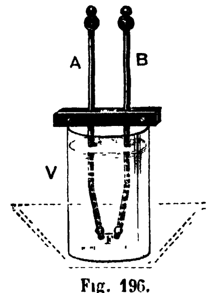
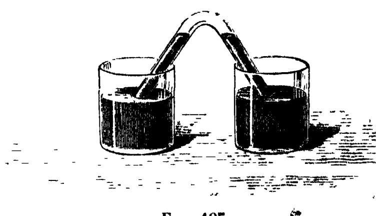


Fig. 196.

Lorsqu'on fait passer la décharge de la batterie dans un fil métallique long (50 cm) et fin, on constate que l'étincelle de la décharge, qui jaillit toujours, est très atténuée ; presque toute l'énergie de la décharge se transforme en chaleur dans le fil.

201. ***Effets chimiques.*** — Lorsqu'une série d'étincelles électriques traverse un gaz formé par la combinaison *exothermique* de deux éléments, son effet le plus ordinaire est de décomposer progressivement le gaz en ses éléments. — Exemple, la décomposition presque complète du gaz ammoniac en ses éléments, azote et hydrogène, expérience que l'on effectue dans les cours de Chimie.

Inversement, une série d'étincelles électriques, en traversant un mélange de gaz simples, déterminent la combinaison lente de ces deux gaz, lorsque cette combinaison est *endothermique*. — On introduit un mélange d'un volume d'azote pur et de deux volumes d'oxygène secs, dans un tube à deux branches plongeant dans deux petites cuvettes de mercure (*fig.* 197) ; l'un des vases communique avec le sol par une petite chaîne de fer ; l'autre, avec une machine électrique. Après le passage d'un grand nombre d'étincelles, on constate qu'il s'est formé des vapeurs rutilantes de peroxyde d'azote, composé endothermique. — Cette expérience est due à Cavendish (*).


Fig. 197.

202. ***Effets physiologiques ou commotions produites par les décharges électriques.*** — Lorsqu'on tire, avec le doigt, une étincelle

(*) Dans l'expérience ainsi faite, la combinaison s'arrête dès qu'il s'est formé une certaine proportion de peroxyde d'azote. — Si l'on opère en présence de la potasse, qui absorbe progressivement le peroxyde d'azote, en formant de l'azotate et de l'azotite de potassium, la totalité des gaz arrive à entrer en combinaison. Toutefois, si le mélange gazeux a été obtenu en ajoutant un excès d'oxygène à de l'air atmosphérique, et qu'après l'absorption des vapeurs rouges par la potasse on se débarrasse de l'excès d'oxygène par du phosphore, on constate qu'il subsiste un résidu gazeux. Ce résidu, comme l'avait déjà remarqué Cavendish, occupe environ la 120e partie du volume de l'air employé ; on sait actuellement qu'il est formé en majeure partie d'argon.

d'une machine électrique, on ne ressent qu'une légère piqûre, si la machine est faiblement chargée. Si la charge est plus forte, on éprouve une commotion dans le poignet ou dans le coude. — Ce sont là les effets qui se produisent, en général, quand le corps humain sert d'intermédiaire pour la production d'une décharge électrique (*).

Si l'on prend dans une main la panse d'une bouteille de Leyde chargée, et qu'on approche l'autre main de l'extrémité de la tige, on éprouve, au moment de la décharge, une commotion qui peut se faire sentir jusque dans les épaules et dans la poitrine. — La commotion peut même être ressentie à la fois par plusieurs personnes, placées à la suite les unes des autres et se tenant par la main, de manière *à faire la chaîne*; la première prend dans la main la panse de la bouteille, la dernière approche le doigt de la tige.

Les décharges d'une bouteille de Leyde ne sont jamais dangereuses. Il n'en est pas de même de celles des batteries; on a pu, en chargeant de grandes batteries avec des machines puissantes, obtenir des décharges qui tuaient instantanément des animaux de grande taille; aussi, ne saurait-on prendre trop de précautions, dans les expériences faites avec des batteries fortement chargées, pour éviter que les décharges passent par le corps de l'expérimentateur

(*) Il ne se produit aucun effet de ce genre quand le corps humain se charge *lentement* d'électricité. — Un expérimentateur, placé sur un tabouret à pieds de verre, met la main sur le conducteur de la machine, avant qu'elle soit mise en activité : quand on fait fonctionner la machine, il éprouve seulement la sensation d'un souffle léger, qui semble courir sur son visage et sur ses mains. — Mais, si un second expérimentateur, placé sur le sol, vient à approcher la main du premier, ils éprouvent tous deux, à chaque étincelle, une commotion.

CHAPITRE II

LE COURANT ÉLECTRIQUE

I. — Courant électrique. — Intensité.

203. ***Courant électrique.*** — Si l'on réunit, par un fil métallique, deux conducteurs A_1, A_2 (*fig.* 198), à des potentiels différents V_1, V_2 ($V_1 > V_2$), il y a passage d'électricité positive du conducteur au potentiel le plus élevé sur le conducteur au potentiel le plus bas (168); si, au moyen d'une *source électrique* (193), on maintient *fixes* ces deux potentiels, ce mouvement d'électricité est continu. Le fil conducteur A_1 A_2, et le milieu diélectrique dans lequel il est plongé, sont alors *le siège d'un ensemble de phénomènes* qui dépendent de la *nature* et des *dimensions* du fil, du *sens* que l'on envisage sur ce fil, et de la *différence de potentiel* $V_1 - V_2$. On dit que *le fil est parcouru par un courant électrique*, et ce sont précisément ces phénomènes qui *définissent l'existence du courant.* Les principaux phénomènes par lesquels le courant manifeste son existence sont :

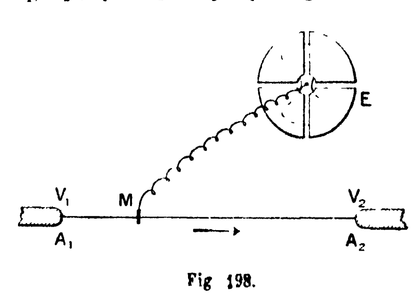


Fig 198.

1° Une chute progressive du potentiel le long du conducteur dans le sens du courant;

2° Un dégagement de chaleur dans le conducteur;

3° Des réactions chimiques dans le conducteur si celui-ci est une solution aqueuse d'un acide ou d'un sel métallique;

4° La production d'un champ magnétique (277) dans le milieu isolant extérieur au conducteur.

Nous étudierons successivement ces divers phénomènes.

204. ***Sens du courant.*** — On adopte pour *sens du courant* le sens dans lequel se meut l'électricité positive, c'est-à-dire le *sens dans lequel il faut se déplacer le long du fil pour aller du potentiel le plus élevé au potentiel le plus bas*; dans la figure 198, où l'on a $V_1 > V_2$ c'est le sens indiqué par la flèche.

205. ***Intensité du courant. — Unité : ampère.*** — On appelle *intensité du courant la quantité d'électricité positive qui traverse, par unité de temps, une section quelconque du fil.*

La quantité d'électricité étant évaluée en *coulombs* et le temps en *secondes*, l'intensité ainsi définie est évaluée au moyen d'une unité d'intensité appelée *ampère* (*) : *c'est l'intensité d'un courant qui débite un coulomb par seconde* (**).

Si donc un courant débite M coulombs en t secondes, son intensité I en ampères est donnée par la formule

$$\text{I ampères} = \frac{\text{M coulombs}}{t \text{ secondes}}.$$

206. ***Unité secondaire de quantité d'électricité : ampère-heure.*** — Au lieu du coulomb, on emploie habituellement, dans l'industrie, une unité particulière de quantité d'électricité, l'*ampère-heure* : c'est la quantité d'électricité débitée par un courant *d'un ampère*, pendant *une heure*; cette unité vaut évidemment 3600 coulombs.

207. ***L'intensité a la même valeur en tous les points d'un fil conducteur parcouru par un courant.*** — Si l'on met un point *quelconque* M du fil $A_1 A_2$ (*fig.* 198) en communication avec l'aiguille d'un électromètre à quadrants (***), on constate que la déviation dépend du point touché, mais *ne varie pas avec le temps* : le potentiel reste fixe en chaque point; l'électricité ne s'accumule donc en aucun point du conducteur $A_1 A_2$; par suite, en raison du principe de la conservation de l'électricité (148), la quantité qui passe à travers une section du fil doit traverser aussi chacune des diverses autres sections : *l'intensité est donc la même en tous les points du conducteur* $A_1 A_2$.

II. — Résistance d'un conducteur. — Loi d'Ohm

208. ***Chute de potentiel le long d'un conducteur cylindrique parcouru par un courant constant.*** — Supposons que dans un

(*) En mémoire d'Ampère, célèbre physicien et mathématicien français (1775-1836). Il créa la branche de l'Électricité qu'on appelle l'Électromagnétisme; inventa avec Arago l'électro-aimant, et eut le premier l'idée du télégraphe électrique.

(**) Nous indiquerons plus tard divers moyens pour mesurer l'intensité d'un courant. L'un d'eux consiste à faire passer le courant à travers un appareil nommé *ampèremètre* (305), dans lequel une aiguille mobile sur un cadran gradué indique l'intensité en ampères.

(***) Pour faire cette expérience, on peut, à défaut d'un électromètre à quadrants, utiliser un électromètre condensateur (192) ou encore un appareil appelé *voltmètre* dont nous indiquerons plus loin le principe (305), l'une des bornes du voltmètre communiquera avec le point M, l'autre borne sera mise au potentiel zéro (conduite d'eau).

conducteur cylindrique (*) homogène, comme un fil métallique OX (*fig.* 199), se propage un courant électrique d'intensité constante.

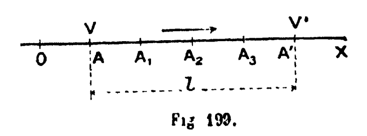


Fig. 199.

Parmi les phénomènes remarquables dont le fil est le siège, nous choisirons, pour l'étudier d'abord, la *variation du potentiel le long du fil conducteur* : nous chercherons comment elle dépend des *dimensions* et de la *nature* du fil conducteur, et ensuite comment elle varie avec l'*intensité* du courant.

209. ***Influence de la longueur du conducteur.*** — Si l'on marque sur le fil OX (*fig.* 199) des segments *égaux*, AA_1, A_1A_2, A_2A_3... et que l'on mesure à l'électromètre ou au voltmètre les chutes de potentiel $V - V_1$, $V_1 - V_2$, $V_2 - V_3$ entre les extrémités de ces segments, on trouve que ces chutes sont *égales*. Si, par exemple, le potentiel tombe d'un volt entre A et A_1, il tombe aussi d'un volt entre A_1 et A_2, entre A_2 et A_3; par suite, entre A et A_2. la chute de potentiel sera de 2 volts; elle sera de 3 volts entre A et A_3, etc.... Donc, *la chute de potentiel* $V - V'$, *qui se produit entre deux points* A *et* A' *d'un fil parcouru par un courant constant, est proportionnelle à la longueur l du fil comprise entre ces deux points;* on pourra donc écrire :

$$\frac{V - V'}{l} = \text{Constante.} \tag{1}$$

On peut, dès lors, représenter graphiquement la variation du potentiel le long du fil. Sur une droite OX (*fig.* 200) on portera en abscisses les distances des divers points du fil à un point O pris pour origine, et perpendiculairement à OX des ordonnées représentant la valeur du potentiel en ces points. Si le potentiel est 5 volts en A, et 3 volts en A', les points B et B' ayant pour ordonnées 5 et 3 représenteront les valeurs du potentiel en A et en A', et, en raison de l'équation (1), la droite BB' représentera la variation du potentiel le long du fil conducteur OX.

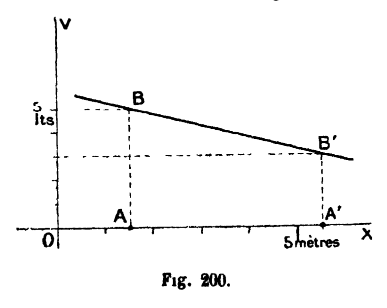


Fig. 200.

210. ***Influence de la section du conducteur.*** — Cherchons maintenant l'influence de la section du conducteur sur la chute de poten-

(*) Nous entendons, par conducteur cylindrique, un conducteur dont la section droite de forme quelconque (circulaire, carrée, etc.) a une valeur constante.

tiel entre deux points. Plaçons, à la suite l'un de l'autre, deux conducteurs cylindriques C et C' (*fig.* 201) de même nature, mais C' ayant une section double de celle de C, et faisons passer un courant d'intensité constante dans le conducteur ainsi constitué. Entre deux points A et A' du fil C, séparés par une distance l, l'électromètre accuse une certaine chute de potentiel V — V'; pour avoir la même chute sur le fil C', l'expérience montre qu'il faut prendre deux points B et B' distants de $2l$. Par suite, d'après le résultat trouvé précédemment (209), la chute de potentiel le long d'un segment l pris sur C, est double de la chute de potentiel le long d'un segment de longueur égale pris sur C'; donc, pour un courant d'intensité donnée, *la chute de potentiel le long d'une portion déterminée d'un conducteur est en raison inverse de la section de ce conducteur.* On peut donc écrire :

Fig. 201.

$$(V - V') . s = \text{Constante}.$$

Le mode de représentation graphique employé au paragraphe précédent conduit au schéma ci-contre (*fig.* 202) pour représenter la chute de potentiel le long des conducteurs C et C'; OM représente le conducteur C; MX le conducteur C'; les droites A_1M_1 et $M_1B'_1$ représentent respectivement la variation du potentiel le long de C et le long de C'; si l'on prend sur OM deux points A et A' distants par exemple de 3 unités de longueur, et que la chute de potentiel entre ces deux points soit d'un volt, pour avoir la même chute d'un volt sur MX, il faudra prendre deux points tels que B et B', distants de 6 unités de longueur.

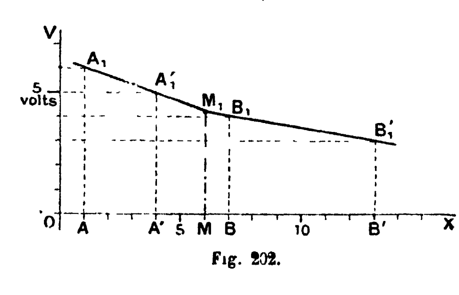


Fig. 202.

211. ***Influence de la nature du conducteur.*** — En plaçant à la suite l'un de l'autre deux conducteurs *de même section*, mais de nature différente, l'électromètre permet de constater que la longueur à prendre sur ces conducteurs, pour observer la même chute de potentiel, dépend de la *nature* du conducteur. Elle est environ 6 fois plus petite pour du fer que pour du cuivre, et à peu près 10 fois plus petite pour du mercure que pour du fer. Si l'on sub-

stitue à un métal une colonne liquide cylindrique, par exemple une solution de sulfate de cuivre à 20 pour 100, la longueur de cette colonne qui, à section égale, et pour un courant de même intensité, produirait la même chute de potentiel qu'une certaine colonne de mercure, aurait une longueur 200 000 fois plus petite.

212. ***Conducteurs équivalents.*** — Nous appellerons *conducteurs équivalents* deux conducteurs cylindriques tels que, si l'on y fait passer le même courant, la chute de potentiel entre les extrémités de ces deux conducteurs soit la même pour chacun d'eux. Pour comparer, à cet égard, différents conducteurs, on peut, par exemple, *indiquer la longueur λ de la colonne de mercure, d'un millimètre carré de section, qui serait équivalente à chacun de ces conducteurs.*

Cette longueur λ sera, d'après ce que nous avons vu, proportionnelle à la longueur l du conducteur et en raison inverse de sa section; elle pourra donc être représentée par la formule :

$$\lambda = \rho \cdot \frac{l}{s},$$

ρ étant un coefficient qui dépend de la nature du conducteur.

La chute de potentiel entre les deux extrémités d'un conducteur déterminé, le long duquel se propage un courant d'intensité donnée, sera alors proportionnelle à la *longueur équivalente λ de ce conducteur;* on pourra donc écrire :

$$\frac{V - V'}{\lambda} = \text{Constante.}$$

213. ***Influence de l'intensité du courant sur la chute de potentiel, entre deux points d'un conducteur donné.*** — Un conducteur cylindrique CC′ est interrompu entre M et M′ (*fig.* 203); on intercale, entre ces deux points, deux conducteurs identiques C_1, C_2, de même nature et de même section que le conducteur CC′. On peut admettre, par raison de symétrie, que, si un courant se propage dans ce conducteur complexe de C vers C′, il passera, par seconde, dans chacun des conducteurs C_1 et C_2, des quantités égales d'électricité; d'ailleurs, la différence de potentiel entre les deux extrémités de C_1 est la même qu'entre les deux extrémités de C_2, et, comme les conducteurs sont identiques, ils doivent être parcourus par des courants égaux. Par suite, et comme conséquence du principe de la conservation de l'électricité, l'intensité en C_1 sera la moitié de l'intensité en C. Or, si l'on mesure à l'électromètre la chute de potentiel qui se

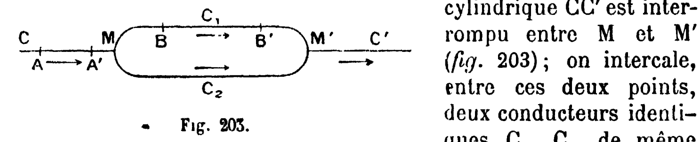


Fig. 203.

produit sur C entre deux points A, A' distants d'une longueur l, et qu'on cherche à quelle distance l'un de l'autre il faut prendre sur C_1 deux points B et B' pour que la chute soit la même qu'entre A et A', on trouve $BB' = 2l$. Il résulte de là que, si l'on prenait sur C_1 deux points B et B_1 tels que l'on eût $BB_1 = AA'$, la chute de potentiel entre B et B_1 serait seulement la moitié de la chute de potentiel entre A et A'; donc, *la chute de potentiel entre deux points donnés d'un conducteur cylindrique parcouru par un courant est proportionnelle à l'intensité du courant.*

214. *Formule générale.* — En résumé, d'après les résultats précédents, *la chute de potentiel* $V - V'$ *entre deux points d'un conducteur cylindrique homogène, parcouru par un courant, est proportionnelle :*

1° *à l'intensité* I *de ce courant;*

2° *à la longueur* λ *de la colonne de mercure de* 1 mm^2 *de section, équivalente à la portion du conducteur comprise entre ces deux points.*

On pourra donc écrire :

$$\frac{V - V'}{\lambda I} = \text{Constante.}$$

Il est possible de réaliser d'une manière simple les expériences invoquées pour établir les diverses lois comprises dans cette formule. On prendra comme conducteur cylindrique une colonne liquide de sulfate de cuivre à 5 ou 6 pour 100, contenue dans des sortes de rigoles obtenues en fixant sur une planche des réglettes ordinaires à section carrée (*fig.* 204). Ce système sera rendu étanche et isolant, en l'imbibant de paraffine chauffée à 150°. Trois de ces rigoles, A, C, D ont des sections égales; la 4e, B a une section double; de gros fils de cuivre *a*, *b*, *c* établissent les communications comme il est indiqué sur la figure. On établit une différence de potentiel d'une vingtaine de volts entre P et N, au moyen d'une pile de quelques éléments au bichromate, ou de petits accumulateurs. Il se produit un courant très peu intense, qui suit le chemin indiqué par les flèches (avec 10 éléments au bichromate, et des rigoles de 50 cm de longueur, A ayant une section de 1 cm^2, l'intensité du courant est seulement $\frac{1}{250}$ d'ampère environ).

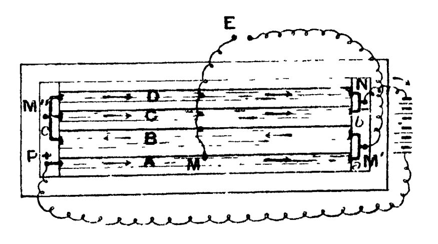


Fig. 204.

1re *Expérience.* — On mesure à l'électromètre E la différence de potentiel entre deux points M et M' pris sur A, à 25 cm l'un de l'autre; on constate que cette différence reste constante quand on déplace M et M' sur A, en laissant fixe leur distance.

2° *Expérience.* — On vérifiera que la différence de potentiel entre les extrémités de B (50 cm de sulfate de cuivre) est la même qu'entre les deux points M et M pris sur A à 25 cm l'un de l'autre, car la section de B est double de celle de A.

3° *Expérience.* — On pourra également vérifier que la différence de potentiel entre *b* et *c* (50 cm de sulfate de cuivre) est aussi la même qu'entre M et M′ (25 cm de sulfate de cuivre), car l'intensité du courant en C est la moitié de l'intensité en A et en B, le courant se partageant par moitié entre C et D.

4° *Expérience.* — Ayant substitué dans A du sulfate de zinc à 17 pour 100 au sulfate de cuivre, on constatera que la différence de potentiel entre les extrémités de A est égale à la différence de potentiel existant actuellement entre les deux extrémités de B, bien que la section de B soit double de celle de A. On voit ici l'influence de la nature du conducteur.

215. ***La longueur équivalente joue le rôle d'une résistance tendant à diminuer l'intensité du courant.* — *Loi d'Ohm.*** — Il résulte immédiatement de la formule précédente que, pour une *différence de potentiel donnée* entre les deux extrémités d'un conducteur cylindrique, l'intensité du courant sera d'autant plus petite, que la longueur équivalente $\lambda = \rho \frac{l}{s}$ sera plus grande; cette quantité joue donc le rôle d'une résistance, qui diminuerait la quantité d'électricité que le courant débite par seconde. On lui a donné, pour cette raison, le nom de *résistance du conducteur*; on la représente habituellement par la lettre R. La formule précédente (214) pourra s'écrire alors :

$$V - V' = K . I . R,$$

où K est une constante.

Cette formule est l'expression de la *loi d'Ohm* : *La chute de potentiel le long d'un conducteur cylindrique est proportionnelle à l'intensité du courant et à la résistance de ce conducteur.*

216. ***Unité de résistance : ohm.*** — Si l'on convient de prendre, comme *unité de résistance*, la résistance d'un conducteur cylindrique tel que la chute de potentiel entre ses extrémités soit de 1 *volt* lorsqu'il est parcouru par un courant de 1 *ampère*, la formule précédente, appliquée à ce conducteur, prendra la forme :

$$1^{\text{volt}} = K \times 1^{\text{ampère}} \times 1$$

et, à cause de cette convention même, la valeur numérique de la constante K sera égale à 1.

L'unité pratique de résistance ainsi définie a été appelée **ohm** (*).

(*) En mémoire d'Ohm, physicien allemand (1787-1854) à qui l'on doit l'énoncé de la loi précédente (1826). Cette loi, déjà entrevue dans un Mémoire de Fourier et Œrstedt, paru en 1823, fut énoncée également (1827) par le physicien français Pouillet (1791-1868), à la suite d'expériences analogues à celles d'Ohm, et faites simultanément. Pouillet est encore l'auteur de travaux importants sur la compressibilité des gaz et

La formule ci-dessus s'écrit alors :

$$(V - V')\ \text{volts} = I\ \text{ampères} \times R\ \text{ohms}\ (*).$$

Pour réaliser un conducteur de 1 *ohm* de résistance, on s'est adressé au mercure, et les expériences ont conduit au résultat suivant: *L'unité électrique de résistance, ou ohm international, est la résistance offerte à un courant invariable par une colonne de mercure à la température de la glace fondante, ayant une masse de* 14,4521 *grammes, une section constante et une longueur de* 106,3 *centimètres.* — La section de cette colonne est alors de 1 mm². — Le Bureau international des Poids et Mesures, établi à Sèvres, a construit un étalon de résistance exactement conforme à la définition.

On trouve, dans le commerce, des copies de cet étalon : elles sont constituées par un tube de verre rempli de mercure, replié plusieurs fois sur lui-même (*fig.* 205) de façon qu'on puisse l'entourer de glace fondante; à ses extrémités sont soudés de larges godets contenant aussi du mercure, dont la résistance est négligeable. — On en construit également des copies en fil de maillechort (*fig.* 206); le fil, contourné en spirale, est noyé dans la paraffine et enfermé dans une boîte; ses extrémités sont soudées à deux grosses tiges métalliques, de résistance négligeable. Ces résistances en fils de maillechort valent un ohm seulement à la température marquée sur la boîte; un thermomètre est joint à l'appareil.

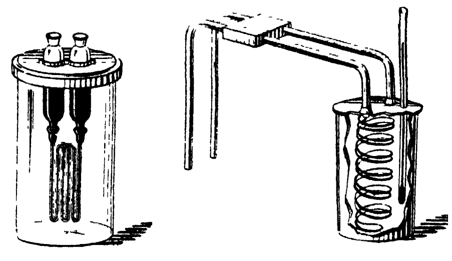


Fig 205. Fig 206.

Nous indiquerons plus loin (237) une méthode simple permettant de comparer à l'ohm les résistances des divers conducteurs.

217. ***Résistance d'une série de conducteurs cylindriques.*** — La résistance R d'une série de conducteurs cylindriques, placés bout à

sur diverses questions de Chaleur : c'est aussi à lui qu'est due l'idée de comparer les résistances électriques des conducteurs à celle d'une colonne de mercure.

(*) On se sert souvent de la lettre grecque ω comme abréviation du mot *Ohm*. La notation R^{ω} signifie R ohms.

(**) Définition adoptée par le Congrès international des électriciens, réuni à Chicago en 1893 Le même Congrès a défini également les autres unités pratiques utilisées en électricité, le coulomb, l'ampère, le volt, etc.... L'emploi de ces unités est obligatoire en France au même titre que l'emploi des unités de mesure du Système métrique (décret du 2 mai 1896).

bout, est égale à la somme des résistances r_1, r_2. r_3... de chacun de ces conducteurs

$$R = r_1 + r_2 + r_3 + \ldots.$$

218. ***Résistivité. — Variation de la résistivité avec la température.*** — Dans la formule qui donne la résistance d'un conducteur

$$R = \rho \frac{l}{s},$$

le coefficient ρ est caractéristique de la nature du conducteur; il a reçu le nom de *résistivité* de la substance considérée; on est convenu, pour déterminer ce coefficient, d'exprimer la résistance R en ohms, la longueur l en centimètres et la section s en centimètres carrés; alors ρ est exprimé en *ohms-centimètres*; c'est, en ohms, la résistance d'un conducteur cylindrique de la substance considérée, ayant 1 cm de long et 1 cm² de section.

La résistivité d'une substance dépend de la température; les mesures ont montré que, *pour les métaux et les alliages*, elle croît avec la température, et qu'elle peut être représentée à $t°$, par une formule analogue aux formules de dilatation,

$$\rho = \rho_0 (1 + at),$$

où a est un coefficient *positif* qui dépend du métal, mais qui ne varie pas beaucoup d'un métal à l'autre. — Pour les dissolutions salines, et pour les corps médiocres conducteurs, comme le charbon, ρ décroît, au contraire, quand la température s'élève; a est donc *négatif*.

Voici pour quelques substances les valeurs de la résistivité ρ, et du coefficient de température a.

I. — MÉTAUX PURS (*).

	ρ_0 à 0° en microhms-cm (**)	a (entre 0° et 100° C.)
Aluminium	2,89	0,00423
Argent	1,49	0,00400
Cuivre	1,58	0,00388
Fer	9,69	0,00625
Mercure	94,07	0,00072
Nickel	11,93	0,00622
Plomb	20,10	0,00411
Platine	10,9	0,00351

(*) Des quantités très faibles d'impuretés altèrent la résistivité d'une manière notable.

(**) Un microhm = 10^{-6} ohm, ou un millionième d'ohm — Un mégohm = 10^6 ohms, ou un million d'ohms — Un méga-mégohm = 10^6 mégohms, ou 10^{12} ohms.

II. — ALLIAGES

Acier au manganèse (12 p. 100 de Mn)	67,14	0,00127
Acier au nickel (4,35 p. 100 de Ni)	29,45	0,00201
Cuivre-manganèse (30 p. 100 de Mn)	100,60	0,00004
Maillechort (Cu 60, Zn 25,5, Ni 14, Fe 0,5)	30,00	0,00036
Fer galvanisé (fil télégraphique)	15,33	»

III. — LIQUIDES. — Résistivités à 17°, en ohms-centimètres

Acide azotique à 38° Baumé (d = 1,36)	1,39
Chlorure de sodium (solution saturée)	5,06
Sulfate de cuivre (solution à 2,5 p. 100)	92,50
— — — à 10,5 p. 100)	31,40
— — — à 15 p. 100)	23,90
— — (solution saturée + 25 p. 100 de SO^4H^2)	19,50
Sulfate de zinc (solution à 5 p. 100)	52,10
— — — à 25 p. 100)	20,90
Eau acidulée $\left(\frac{1}{5}\right.$ de SO^4H^2 en volume$\left.\right)$	0,[illegible]2
— — $\left(\frac{1}{8}\right.$ — — $\left.\right)$	1,01
— — $\left(\frac{1}{10}\right.$ — — $\left.\right)$	1,12

IV. — SUBSTANCES DIVERSES

Charbon des filaments de lampes (à froid).	0,006	ohms-cm.
Phosphore rouge, à 20°	132,000	—
Soufre ordinaire, à 125°	5000,000	—
Ivoire, à 24°	12,	mégohms-cm.
Ardoise	280,	—
Marbre blanc	8800,	—
Gomme-laque	9000,	méga-mégohms-cm.
Paraffine	34000,	—
Verre ordinaire, à 20°	91,	—
— — a 60°	0,7	—
Cristal, à 20° (d = 3)	100000,	—
Gutta (exigée pour les câbles), à 24°	200,	—
Air sec à la température ordinaire	∞	—

On peut remarquer, en particulier, que, pour le verre, la résistivité décroît très rapidement quand la température s'élève.

219. ***Applications.*** — Comme applications de ces résultats, proposons-nous de résoudre les deux problèmes suivants :

1° *Quelle est, en ohms, la résistance d'une ligne télégraphique en fil de fer galvanisé de 4 millimètres de diamètre, allant de Paris à Vesoul* (381 *km*)?

En consultant le tableau des résistivités (218), on trouve pour le fil de fer galvanisé $\rho = 15,33$ microhms-cm, c'est-à-dire $15,33 \times 10^{-6}$ ohms-cm. Appliquons la formule $r = \rho \frac{l}{s}$; l sera exprimé en centimètres et s en centimètres carrés; on aura donc :

$$r = \frac{15,33 \times 10^{-6} \times 381 \times 10^5}{\pi \times \overline{0,2}^2} = 4\,648 \text{ ohms.}$$

2° *Quelle est, à la température de l'air liquide* (— 184°), *la résistance d'un fil de cuivre de* 1 *mètre de long et de* $\frac{1}{10}$ *de millimètre de diamètre?*

La résistance à une température donnée t a pour expression :

$$r = \rho_0 (1 + at) \frac{l}{s}.$$

En cherchant dans la table, on trouve $\rho_0 = 1{,}58$ microhm-cm, et $a = 0{,}00388$; en portant ces valeurs dans l'expression de r et faisant $t = -184°$, on trouve :

$$r = \frac{1{,}58 \times 10^{-6} (1 - 0{,}00388 \times 184) \times 100}{\pi \times \overline{0{,}005}^2} = 0{,}39 \text{ ohm}.$$

A 0°, cette résistance deviendrait égale à 2 ohms environ.

III. — Énergie du courant.

220. ***Énergie disponible entre deux points d'un conducteur parcouru par un courant. — Puissance du courant.*** — Sur un conducteur le long duquel se propage un courant électrique, envisageons deux points A et B respectivement aux potentiels V et V' volts, (V > V'); si R ohms est la résistance de cette portion AB du conducteur, et I ampères l'intensité du courant, la chute de potentiel V — V', entre A et B, sera égale à IR. Par seconde, I coulombs feront entre A et B une chute de potentiel de V — V' = IR volts; or, quand *un coulomb* tombe d'*un volt*, il produit un travail d'*un joule*; donc, entre A et B, il y aura de disponible, par seconde, I(V — V'), ou I^2R joules.

Nous savons (196) qu'on appelle *puissance d'une machine*, ou plus généralement d'*une source d'énergie, le travail que cette source fournit par seconde*; donc, entre A et B, la puissance du courant est, en *watts*,

$$P = I(V - V') = I^2R.$$

Le travail fourni entre A et B dans un temps t secondes par le courant sera par suite :

$$W = I^2Rt \text{ joules.}$$

Cette énergie disponible peut, suivant les cas, donner lieu à diverses manifestations, produire divers effets que nous étudierons successivement; les uns ont pour siège la masse même du conducteur : dégagement de chaleur, décompositions chimiques; les autres se font sentir dans le milieu extérieur au conducteur le long duquel

le courant se propage : tels sont les effets sur l'aiguille aimantée, ou effets électro-magnétiques.

221. ***Unités secondaires pratiques de travail électrique : watt-heure et ses multiples.*** — On emploie habituellement, comme unité secondaire pratique de travail ou d'énergie électrique, le *watt-heure* (w-h) : c'est *le travail que fournit par heure une machine ayant une puissance d'un watt*; le *watt-heure* vaut, par suite, 3600 *joules*. — L'*hectowatt-heure* (hw-h) et le *kilowatt-heure* (kw-h), valant respectivement 360000 et 3600000 joules, sont aussi employés d'une manière courante.

IV. — Transformation de l'énergie électrique en chaleur. Loi de Joule.

222. ***Dégagement de chaleur dans un conducteur parcouru par un courant.*** — Prenons un fil métallique et immergeons-le dans un calorimètre, puis faisons passer dans ce fil un courant constant de quelques ampères; le thermomètre indique que le liquide calorimétrique s'échauffe, et par suite que le passage du courant dégage de la chaleur. En prolongeant l'expérience pendant quelques minutes, on voit que le thermomètre monte sensiblement du même nombre de degrés par chaque minute; il en résulte que la *chaleur versée par le courant dans le calorimètre est proportionnelle au temps.* Si l'on double l'intensité, l'ascension du thermomètre est quatre fois plus rapide; si l'on réduit l'intensité à la moitié, au tiers de sa valeur primitive, l'ascension du thermomètre, par minute, est réduite au quart, au neuvième de ce qu'elle était d'abord; *la chaleur dégagée par minute est proportionnelle au carré de l'intensité du courant.*

L'intensité du courant restant fixe, si l'on substitue au fil employé un fil ayant une résistance double ou triple, le nombre de degrés dont le thermomètre monte par minute est lui-même double ou triple, et par suite *la quantité de chaleur versée par minute dans le calorimètre est proportionnelle à la résistance du fil conducteur utilisé.*

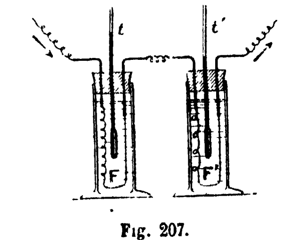


Fig. 207.

On peut assez facilement montrer ces divers résultats au moyen du dispositif suivant. Le calorimètre est simplement constitué par une éprouvette contenant environ 100 g de pétrole(*) (*fig.* 207); on fait passer un courant d'envi-

(*) Le pétrole est commode, à cause de son pouvoir isolant et de sa faible chaleur spécifique ($c = 0,5$).

ron 6 ampères dans deux fils de fer F, F′ de 0,25 mm de diamètre et ayant 50 cm et 25 cm de longueur; leurs résistances respectives sont sensiblement 1 ohm et 0,5 ohm; ils sont plongés chacun dans une éprouvette calorimétrique. Le thermomètre *t* monte d'une dizaine de degrés par minute, tandis que *t′* ne monte que d'environ cinq degrés. Si l'on réduit l'intensité à 3 ampères, *t* ne monte plus que de 2°,5 et *t′* d'environ 1°,25 par minute

Si le fil n'avait pas été plongé dans le liquide, la chaleur dégagée aurait rapidement élevé sa température; on aurait vu le fil rougir, devenir blanc, puis brûler au contact de l'air en projetant des étincelles de tous côtés.

223. ***Loi de Joule***. — Par des expériences calorimétriques précises, Joule a établi l'exactitude rigoureuse des résultats précédents (222). Donc le nombre Q de calories dégagées dans un conducteur de résistance R ohms, par le passage, pendant un temps *t* secondes, d'un courant ayant I ampères d'intensité, aura pour expression

$$Q = A.R\,I^2 t,$$

où A est une constante. Cette formule représente la *loi de Joule*.

224. ***Équivalence de la chaleur et de l'énergie électrique***. — Si l'on compare l'expression de la chaleur dégagée dans un conducteur donné, parcouru par un courant, à l'expression, trouvée plus haut (220), de l'énergie électrique disponible dans ce conducteur, on trouve immédiatement

$$Q = A.W,$$

ou

$$\frac{W}{Q} = \frac{1}{A} = J,$$

J étant aussi une constante, inverse de la constante A.

Nous arrivons ainsi à une relation extrêmement remarquable L'*énergie électrique* qui n'est pas utilisée sous forme chimique ou mécanique le long du conducteur semble *disparaître*; mais il *apparaît*, à la place, une certaine *quantité de chaleur*; de plus, à *chaque calorie produite*, correspond la disparition d'un *nombre de joules* égal à J. — Une quantité déterminée de chaleur se présente donc ici comme équivalente à une quantité déterminée d'énergie électrique : or, cette dernière équivaut à une certaine quantité de travail mécanique (220); nous pouvons donc dire que l'énergie électrique, le travail mécanique et la chaleur sont *trois formes différentes d'une même grandeur* à laquelle nous donnons le nom général d'*énergie*. L'énergie est une grandeur qui peut changer de forme, mais qui se *conserve en quantité* (*).

(*) On doit à Joule d'autres expériences qui montrent directement l'équivalence de la chaleur et du travail mécanique, et qui ont donné la valeur numérique de J.

Si l'on mesure exactement, en calories, la chaleur dégagée dans un conducteur par le passage, pendant un temps donné, d'un courant d'intensité connue, et si l'on connaît, en outre, la résistance de ce conducteur, on pourra calculer le nombre J de joules, dont la disparition crée *une calorie* : on a trouvé

$$J = 4,18 \text{ joules.}$$

Ce nombre est ce que l'on appelle l'*équivalent mécanique de la calorie*. Son inverse

$$A = 0,24 \text{ calorie,}$$

représentant le nombre de calories équivalent à 1 joule, a reçu le nom d'*équivalent calorifique du joule*.

225. ***Conséquences de la loi de Joule. — Applications.*** — Si un conducteur parcouru par un courant ne rayonnait pas dans le milieu extérieur, sa température s'élèverait indéfiniment; mais, la quantité de chaleur rayonnée par seconde étant d'autant plus grande que la différence de température entre le conducteur et le milieu extérieur est elle-même plus grande, il arrive un moment où la chaleur rayonnée par seconde est égale à celle qui est versée par le courant; à ce moment, la température se maintient fixe. Mais si l'on augmente l'intensité on arrive fatalement à fondre le fil (*).

Coupe-circuits fusibles. — Sans aller jusqu'à la fusion du conducteur, il peut être dangereux que, dans les canalisations électriques industrielles, la température dépasse une certaine valeur; il est donc nécessaire, dans la pratique, de ne pas donner à l'intensité une valeur trop grande. On admet que, pour les conducteurs en cuivre placés dans l'air, l'intensité ne doit pas dépasser 5 à 6 ampères par millimètre carré de section; pour des fils recouverts d'une enveloppe isolante (gutta, caoutchouc, etc.), l'intensité doit être limitée à 2 ou 3 ampères par millimètre carré.

Afin d'éviter un échauffement anormal des conducteurs, par suite d'une augmentation accidentelle de l'intensité, on place, sur le trajet du courant, des *coupe-circuits fusibles*, formés par un fil de plomb,

(*) Pour des fils nus, dans un air calme, l'intensité en *ampères* nécessaire pour fondre un fil métallique est donnée approximativement par la formule $I = a\sqrt{d^3}$, où a est une constante qui dépend de la nature du fil et d son diamètre en centimètres. Le tableau ci-dessous donne, outre les valeurs de a pour quelques métaux, l'intensité I nécessaire pour fondre un fil d'un millimètre de diamètre.

	a	I
Cuivre	2530	80,0 ampères
Aluminium	1873	59,2 —
Platine	1277	40,4 —
Fer	777	24,6 —
Plomb	340	10,8 —

ou d'alliage fusible f (*fig.* 208), de 2 ou 3 cm de longueur, et de diamètre convenablement choisi. Si l'intensité augmente trop, la fusion du fil de plomb interrompt le courant.

A f B

Fig. 208.

Nous reviendrons plus loin sur deux autres applications très importantes de la loi de Joule (éclairage par incandescence et chauffage).

V. — Généralités sur les générateurs et les récepteurs d'énergie électrique.

226. *Générateurs.* — Nous avons appelé *générateur électrique* ou *électromoteur* (193), un appareil capable de transformer en *énergie électrique* une forme quelconque de l'énergie. Ces appareils peuvent être partagés en trois groupes, correspondant aux trois formes d'énergie qu'on utilise pour les alimenter.

1° *Générateurs mécaniques*, utilisant du travail mécanique : telles sont les machines électrostatiques, que nous avons déjà étudiées (194), et les machines d'induction électromagnétique, que nous étudierons plus loin (359).

2° *Générateurs thermiques*, utilisant de la chaleur (piles thermo-électriques).

3° *Générateurs électrochimiques*, utilisant de l'énergie mise en jeu par des réactions chimiques (piles, accumulateurs).

Ces générateurs, quels qu'ils soient, ont pour *fonction essentielle* commune d'élever de l'électricité d'un certain potentiel (en général, celui du sol) à un potentiel plus haut et, par suite, de lui communiquer une certaine quantité d'énergie électrique.

227. *Force électromotrice et puissance d'un générateur.* — Nous appellerons *force électromotrice d'un générateur, la quantité d'énergie électrique (mesurée en joules) qu'il communique à un coulomb.* Si E est cette énergie, et que I ampères soit l'intensité du courant qui se propage le long du circuit, l'énergie électrique totale W joules produite par le générateur en un temps t secondes, sera

$$W = EIt$$

et, par seconde, cette énergie aura pour valeur

$$P = \frac{W}{t} = EI.$$

Cette *quantité d'énergie* P, *fournie par seconde*, est ce qu'on appelle la *puissance* du générateur ; elle se mesure en *watts*, comme nous l'avons déjà dit.

Proposons-nous maintenant de déterminer la force électromotrice E. Le générateur étant en activité, le courant part du pôle positif A (*fig.* 209); le potentiel tombe d'une façon continue le long du circuit extérieur AMB, devient minimum au pôle négatif B, puis remonte brusquement à l'intérieur du générateur. Si le conducteur extérieur est cylindrique et homogène, et que l'on imagine le circuit coupé en un point M quelconque, puis rectifié en MGM′ (*fig.* 210), le mode de représentation déjà indiqué (209) montre la chute de potentiel : de 20 volts en M, par exemple, le potentiel tombe à zéro en B, pôle négatif du générateur, puis remonte brusquement de 0 à 60 volts dans le générateur; il tombe ensuite de 60 à 20 volts de G en M′. L'électricité parcourt donc un circuit fermé comprenant deux parties : 1° le circuit extérieur de résistance r, et 2° le générateur. Supposons que, dans le circuit extérieur, l'énergie mise en jeu soit uniquement de la chaleur dégagée en vertu de la loi de Joule, elle sera par seconde égale à I^2r joules; d'autre part, si r' est la résistance intérieure du générateur (entre les bornes), l'énergie dépensée par seconde, sous forme de chaleur, dans le générateur, en vertu de la loi de Joule, sera de même I^2r' joules; et la *puissance* du courant, pour *tout le circuit*, sera, en watts

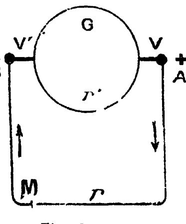


Fig. 209.

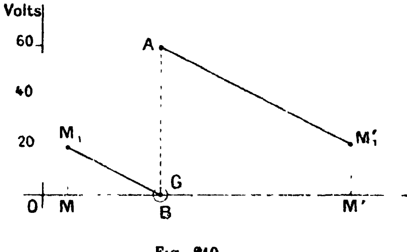


Fig. 210.

$$I^2(r + r').$$

Écrivons que cette énergie, dépensée en chaleur, est égale à celle que le générateur a créée dans le même temps, puisque, par hypothèse, il ne se produit rien d'autre dans le circuit, on aura :

$$I^2(r + r') = EI$$

d'après la définition même de E. — On déduit de là immédiatement

$$E = Ir + Ir';$$

mais si l'on désigne par V et V′ les potentiels aux extrémités A

et B du circuit extérieur de résistance r, la quantité $V - V'$, c'est-à-dire la *différence de potentiel aux bornes* du générateur, $(V > V')$, a pour expression (216)

$$V - V' = I r$$

et, par suite,

$$E = V - V' + I r'.$$

Cette relation met en évidence un fait important : *la différence de potentiel* $V - V'$ *aux bornes d'un générateur électrique est toujours inférieure à la force électromotrice* E *de ce générateur.*

228. ***Mesure de la force électromotrice d'un générateur.*** — La mesure de la différence de potentiel $V - V'$ aux bornes du générateur, de l'intensité I et de la résistance r' du générateur au repos, permettra toujours de calculer E. Le produit Ir' d'une *résistance*, mesurée en *ohms*, par une *intensité* de courant mesurée en *ampères*, est égal, d'après la loi d'Ohm, à une *différence de potentiel* mesurée en *volts*; donc E *sera exprimée en volts*. C'est ce qu'on devait prévoir : d'après sa définition (227), la force électromotrice E est le quotient d'une quantité d'énergie W par une quantité d'électricité M ou It (énergie fournie à un coulomb); et il en est de même d'une différence de potentiel (171).

229. ***Rendement électrique d'un générateur.*** — On appelle *rendement électrique* d'un générateur le rapport de l'énergie électrique $(V - V')I$ disponible dans le circuit extérieur à l'énergie électrique totale EI produite par ce générateur; cette quantité sera donc exprimée par le rapport

$$\frac{(V - V')I}{EI} = \frac{V - V'}{E}.$$

Ce rapport est toujours plus petit que l'unité, puisque $V - V'$ est toujours plus petit que E. — L'énergie non utilisable apparaît dans le générateur sous forme de chaleur de Joule.

230. ***Récepteurs électriques.*** — Les récepteurs électriques en général sont des appareils dans lesquels on utilise l'énergie électrique fournie par un générateur. Comme les générateurs, ils peuvent se répartir en trois groupes :

1° *Récepteurs thermiques*, dans lesquels l'énergie recueillie est *uniquement* de la chaleur, dégagée en vertu de la loi de Joule (lampes à incandescence, appareils de chauffage électrique);

2° *Récepteurs mécaniques*, dans lesquels *une partie* de l'énergie recueillie produit des effets mécaniques (moteurs électriques, signaux électriques de divers ordres : signaux de chemins de fer, sonneries, récepteurs télégraphiques et téléphoniques, etc.); *le reste* apparaît sous forme de chaleur de Joule.

3° *Récepteurs chimiques*, dans lesquels *une partie* de l'énergie recueillie produit des effets chimiques (appareils de galvanoplastie, d'électrométallurgie, etc); *le reste* apparaît ici encore sous forme de chaleur de Joule.

Ces récepteurs, quels qu'ils soient, ont pour fonction essentielle commune d'abaisser le potentiel de l'électricité qui les traverse, d'une valeur V_1 à une autre valeur $V'_1 < V_1$.

231. ***Force électromotrice inverse d'un récepteur.*** — Considérons les récepteurs des 2° et 3° groupes, dans lesquels l'énergie recueillie ne produit pas uniquement de la chaleur de Joule; on appelle *force électromotrice inverse, ou contre-force électromotrice du récepteur, la quantité d'énergie* E_1 *autre que l'énergie thermique, mesurée en joules, qu'un coulomb y abandonne quand il traverse ce récepteur.*

Soit r_1 la résistance propre du récepteur et I l'intensité du courant qui le traverse; en représentant par $V_1 - V'_1$ la différence positive de potentiel aux bornes du récepteur, on aura, comme ci-dessus (227),

$$I(V_1 - V'_1) = E_1 I + I^2 r_1,$$

ou

$$E_1 = (V_1 - V'_1) - I r_1.$$

La force électromotrice inverse du récepteur est donc plus petite que la chute de potentiel entre les bornes.

Il est évident, d'ailleurs, que cette force électromotrice E_1 sera mesurée en volts, comme la force électromotrice d'un générateur.

On appelle *rendement* du récepteur le rapport de l'énergie réellement utilisée à l'énergie disponible entre les bornes; cette quantité a donc pour expression :

$$\frac{E_1 I}{(V_1 - V'_1) I} = \frac{E_1}{V_1 - V'_1};$$

la différence inutilisable $I^2 r_1$ apparaît dans le récepteur sous forme de chaleur de Joule.

232. ***Généralisation de la formule d'Ohm.*** — La formule d'Ohm (216)

$$V - V' = I r$$

a été établie pour un conducteur homogène entre les deux extrémités duquel ne se trouvent intercalés ni récepteurs mécaniques ou chimiques, ni générateurs, et par suite où l'énergie du courant apparaît tout entière sous la forme de chaleur.

Supposons que, sur le trajet d'un courant d'intensité I, entre les deux points A et B d'un conducteur (*fig.* 211), se trouvent placés un générateur G et un récepteur M, et proposons-nous d'étendre la formule d'Ohm à ce cas. Soient V le potentiel en A, et V′ le

potentiel en B; V_1 et V_2, V_3 et V_4, ($V_2 > V_1$, et $V_3 > V_4$) les potentiels aux bornes du générateur et du récepteur; soient E et E' leurs forces électromotrices, r et r' leurs résistances intérieures entre les bornes; appelons r_1, r_2, r_3, les résistances des portions de conducteurs, extérieures au générateur et au récepteur. Nous pourrons écrire les équations suivantes :

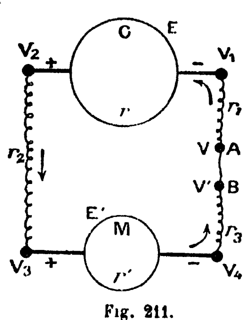


Fig. 211.

$$V - V_1 = Ir_1 \text{ (conducteur } r_1\text{)}$$
$$E = V_2 - V_1 + Ir \text{ (générateur)}$$
$$V_2 - V_3 = Ir_2 \text{ (conducteur } r_2\text{)}$$
$$V_3 - V_4 = E' + Ir' \text{ (récepteur)}$$
$$V_4 - V' = Ir_3 \text{ (conducteur } r_3\text{)}$$

Additionnons membre à membre, il vient :

$$V - V' + E = E' + I(r_1 + r_2 + r_3 + r + r');$$

ou en désignant par R la résistance totale du circuit AGRB

$$V - V' + E - E' - IR = 0$$

Telle est la relation qui doit être substituée à la formule d'Ohm, lorsqu'un générateur et un récepteur sont placés entre deux points A et B d'un circuit. — S'il y avait plusieurs générateurs et plusieurs récepteurs, il suffirait de remplacer E — E' par la somme algébrique des forces électromotrices, en considérant celles des générateurs comme positives et celles des récepteurs comme négatives.

233. *Cas d'un circuit fermé complet.* — Si, en particulier, les deux points A et B coïncident, V = V', et la formule se réduit à

$$E - E' = IR$$

qui représente *la formule d'Ohm appliquée à un circuit fermé complet.*

On l'écrit encore

$$IR - \Sigma e = 0,$$

où Σe représente la somme algébrique des forces électromotrices directes et inverses du circuit.

234. *Applications de la loi d'Ohm.* — *Courants dérivés.* — Un circuit est bifurqué entre deux points A et B (*fig.* 212); les branches

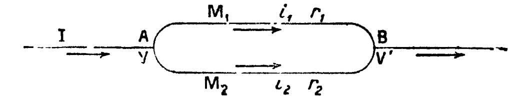


Fig. 212.

M_1, M_2 ont respectivement pour résistances r_1 et r_2 : trouver com-

ment le courant principal d'intensité I se partage entre les deux branches.

Le principe de la conservation de l'électricité fournit une première relation :

$$(1) \qquad I = i_1 + i_2.$$

Puisque la chute de potentiel est la même le long de ces conducteurs (on suppose qu'ils ne contiennent ni générateurs, ni récepteurs autres que des récepteurs thermiques), la loi d'Ohm, appliquée aux deux conducteurs M_1 et M_2, donne :

$$(2) \qquad V - V' = i_1 r_1 = i_2 r_2, \qquad \text{ou} \qquad (3) \qquad \frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1}.$$

Les intensités sont inversement proportionnelles aux résistances correspondantes.

De ces équations, on tire :

$$i_1 = I \cdot \frac{r_2}{r_1 + r_2} \qquad \text{et} \qquad i_2 = I \frac{r_1}{r_1 + r_2}$$

L'équation (2) peut s'écrire :

$$\frac{i_1}{\frac{1}{r_1}} = \frac{i_2}{\frac{1}{r_2}} = \frac{i_1 + i_2}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} = \frac{I}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}}.$$

Posons :

$$(4) \qquad \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{1}{R},$$

R satisfera à la relation

$$V - V' = IR;$$

donc R est la *résistance unique équivalente* aux deux branches M_1 et M_2. On étendrait sans peine cette relation (4) au cas où plus de deux conducteurs seraient intercalés entre les points A et B,

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \cdots$$

Convenons d'appeler *conductance* l'inverse de la résistance d'un conducteur; le résultat précédent pourra s'énoncer ainsi : *La conductance d'un faisceau de conducteurs réunissant deux points* A *et* B *d'un circuit est égale à la somme des conductances individuelles de ces conducteurs* (*).

235. ***Lois de Kirchhoff.*** — Le problème des courants dérivés

(*) Il serait naturel de prendre, comme *unité de conductance*, la conductance d'un conducteur ayant *un ohm* de résistance. Lord Kelvin a proposé de donner à cette unité le nom de *mho* qui n'est autre chose que le mot *ohm* retourné.

peut être généralisé, et on peut avoir à le résoudre en pratique dans des cas réellement compliqués : l'application de deux formules dues à Kirchhoff facilite alors beaucoup les calculs.

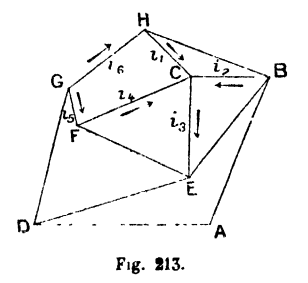


Fig. 213.

Soit un réseau de conducteurs pouvant contenir des générateurs et des récepteurs; si l'on représente par i_1, i_2, i_3... les intensités des courants dans les différentes branches qui aboutissent à un même sommet C (*fig.* 213), par exemple, et qu'on regarde comme positives les intensités des courants qui se dirigent vers le sommet, et comme négatives celles des courants qui s'éloignent de ce sommet, on a évidemment, pour chaque sommet, d'après le principe de la conservation de l'électricité,

$$i_1 + i_2 + i_3 + \ldots = 0$$

ou

$$(1) \qquad \Sigma i = 0.$$

Considérons maintenant un circuit simple *fermé*, obtenu en prenant un nombre quelconque de branches placées bout à bout, CFGH, par exemple; on peut appliquer à ce circuit fermé la formule d'Ohm généralisée. Supposons qu'on parcoure le circuit dans un certain sens, pris comme sens positif, et que l'on regarde comme positives les intensités des courants qui se propagent dans ce sens, et comme négatives les intensités des courants se propageant en sens inverse; de même, prenons comme positives les forces électromotrices des générateurs et des récepteurs qui, *par rapport au sens adopté*, élèvent le potentiel, et comme négatives celles qui l'abaissent; si r_1, r_4... sont les résistances des branches du circuit fermé considéré, on aura, en lui appliquant la loi d'Ohm :

$$(2) \qquad \Sigma(ir - e) = 0$$

Ces deux formules (1) et (2) constituent les *lois de Kirchhoff*.

236. ***Boîtes de résistances***. — ***Rhéostats***. — On construit des boîtes de résistances (*fig.* 214) contenant des bobines de fil de cuivre ou de maillechort dont les résistances représentent les multiples 1, 2, 2 et 5 de l'ohm, et de ses multiples décimaux; ces résistances sont disposées de façon qu'on puisse, à volonté, introduire dans un circuit telles ou telles combinaisons de bobines.

Les pièces de cuivre successives A, B, C,.... I, K, L (*fig.* 215),

fixées sur une plaque isolante en ébonite servant de couvercle à la boîte, sont réunies entre elles par des chevilles métalliques D, E....

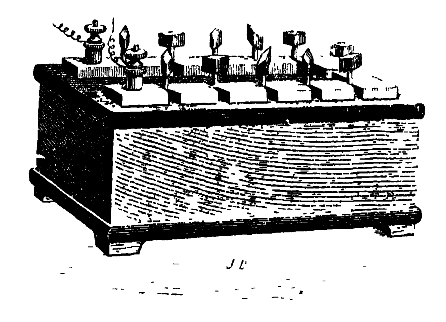


Fig. 214.

F, G. Au-dessous de chaque cheville se trouve, dans la boîte, une bobine sur laquelle est enroulé un fil métallique recouvert de soie,

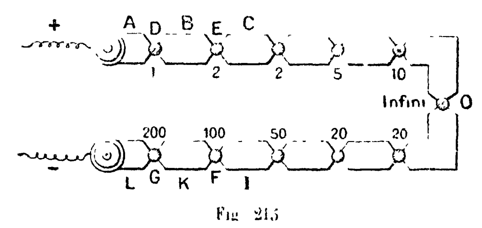


Fig. 215.

et dont les deux extrémités *a*, *b* (*fig.* 216) sont soudées aux deux pièces de cuivre, telles que A, B, que cette cheville D réunit quand elle est en place. Quand toutes les chevilles sont enlevées, et que l'on intercale la boîte sur un circuit, le courant est obligé de passer successivement à travers toutes les bobines, pour aller de A en L (*fig.* 215). Alors, si l'on met en place l'une des chevilles, D, par exemple (*fig.* 216), au-dessus de la bobine marquée 1 ohm, le courant d'intensité I arrivant en *a*, se bifurque; une partie i_1 passe directement de *a* à *b* à travers la cheville D; le reste, i_2 prend le chemin *a*M*b*, et ces intensités sont (234) en raison inverse des résistances correspondantes; or la résistance du conducteur *a*D*b* est

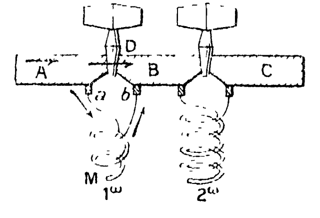


Fig. 216.

extrêmement faible (de l'ordre de 10^{-6} ohm)(*); le courant i_2 ne sera pas même la millionième partie de i_1; c'est-à-dire qu'il sera pratiquement négligeable; et l'on peut dire sans erreur appréciable que le courant total I passera directement de A à B par la cheville interposée. Donc, mettre une cheville en place revient à supprimer la résistance correspondante. La résistance totale introduite par l'intercalation de la boîte dans un circuit, sera par suite égale à la somme des résistances correspondant aux chevilles qui ne sont pas en place; comme les valeurs de ces résistances sont gravées sur la boîte même (*fig.* 215), une simple lecture indiquera le nombre d'ohms qu'elles représentent (**).

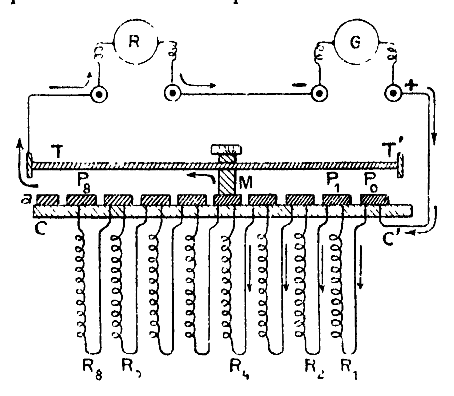


Fig. 217.

Ces résistances sont habituellement étalonnées pour la température de 15° centigrades; il est nécessaire de leur faire subir une correction, si la température est notablement différente (218).

Rhéostats. — Les boîtes de résistances que nous venons de décrire sont des appareils de mesure soigneusement étalonnés, et ne devant jamais être traversés que par des courants très faibles.

Dans les applications industrielles du courant électrique, on dispose en général d'un voltage déterminé (110 volts dans la plupart des circuits d'éclairage, par exemple). Si l'on veut faire passer le courant dans un récepteur quelconque, il suffira de le relier aux deux bornes de la canalisation; toutefois, il arrive souvent, en pratique, que le récepteur, en raison de la faible valeur de sa résistance, serait traversé par un courant capable de le détériorer; il faut donc pouvoir réduire à volonté l'intensité du courant; on y arrive en intercalant dans le circuit une série de résistances formées de fils assez gros pour supporter le courant, sans être soumis à une élévation exagérée de température (225). Une telle série de

(*) C'est en effet la résistance d'une barre de cuivre de longueur *ab*, inférieure à 1 cm, et d'au moins 1 cm^2 de section.

(**) A côté de l'une des chevilles 0 (*fig.* 215), se trouve gravé le mot *infini*; cela signifie que, si l'on enlève la cheville correspondante, on introduit une résistance infinie; en d'autres termes, on coupe le circuit.

résistances porte le nom de *rhéostat*; la figure 217 en donne une représentation schématique.

Sur une table isolante CC′ (marbre ou ardoise), sont fixés des *plots* en cuivre P_0, P_1, P_2,.... auxquels sont soudées des résistances en maillechort, ou en acier-nickel R_1, R_2.... Un contact métallique glissant M peut être amené sur l'un quelconque des plots; il est guidé par une tige métallique TT′. Au moyen des connexions indiquées sur la figure, on intercale le rhéostat sur le circuit qui relie le générateur électrique G au récepteur R; le courant suit le chemin indiqué par les flèches : on voit immédiatement, dans le cas de la figure, que les résistances R_1, R_2, R_3 et R_4 sont seules intercalées sur le circuit, et l'on comprend sans peine comment on pourrait, à volonté, en déplaçant le contact glissant, ajouter, ou supprimer des résistances dans le circuit.

Le dernier plot *a* est isolé, et quand on y amène le contact glissant, le courant est interrompu (*).

On peut remarquer que les premières résistances sont traversées par des courants relativement intenses, quand elles sont seules en

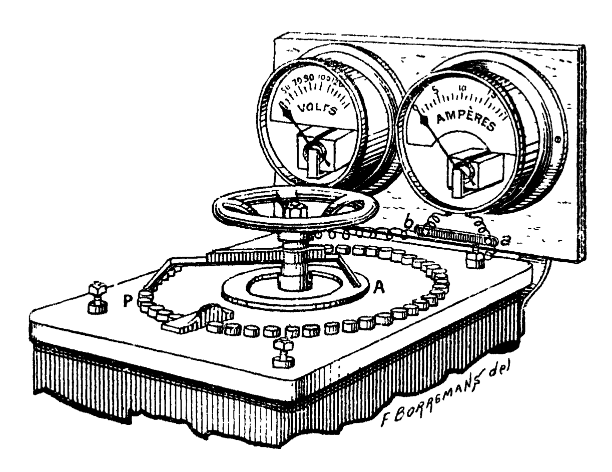


Fig. 218.

circuit, tandis que les dernières R_7, R_8, ne sont jamais soumises

(*) On remarquera que la largeur du contact glissant est supérieure à l'intervalle compris entre deux plots consécutifs; en sorte que pendant son déplacement le contact communique toujours avec un plot avant d'avoir quitté le plot précédent; ce dispositif est destiné à éviter les ruptures complètes du courant pendant la manœuvre du rhéostat, ces ruptures déterminant, entre les conducteurs que l'on sépare, de fortes étincelles qui détérioreraient rapidement les plots et le contact glissant lui-même.

qu'à des courants assez faibles. Il est nécessaire de tenir compte de cette remarque dans la construction du rhéostat, et d'employer pour les résistances qui doivent supporter un courant intense, des fils de gros diametre, afin d'éviter la fusion de ces fils (225).

En pratique, les plots P_0, P_1, etc., sont placés sur le pourtour d'un cercle; le contact glissant est formé d'une barre métallique PA dirigée suivant un diamètre du cercle et qu'un volant permet de faire tourner autour de son centre (*fig.* 218); l'extrémité P glisse sur les plots et l'extrémité A glisse sur un cercle continu en cuivre qui joue le rôle de la tige TT′ (*fig.* 217). Deux appareils destinés à mesurer le voltage aux bornes du récepteur et l'intensité du courant sont en général joints au rhéostat.

237. ***Comparaison des résistances. — Pont de Wheatstone.*** — La comparaison des résistances se fait habituellement au moyen d'un dispositif connu sous le nom de *pont de Wheatstone*; en voici le principe. Le courant fourni par une pile P (*fig.* 219) est bifurqué entre C et D; dans les deux branches CMD et CND, sont intercalées des résistances r, r_1 dans M, et r', r'_1 dans N; de plus, entre les deux points M et N est jeté un *pont* MN, dans lequel il ne doit pas passer de courant; un appareil G, appelé *galvanomètre*, que nous étudierons plus loin, permet de constater si le courant dans MN est nul. Pour qu'il en soit ainsi, il suffira que les points M et N soient au même potentiel; par suite, les chutes de potentiel de C en M et de C en N seront égales; il en sera de même des chutes le long de MD et de ND. De plus, l'intensité i dans CM étant la même que dans MD, et l'intensité i' dans CN la même que dans ND, on pourra écrire :

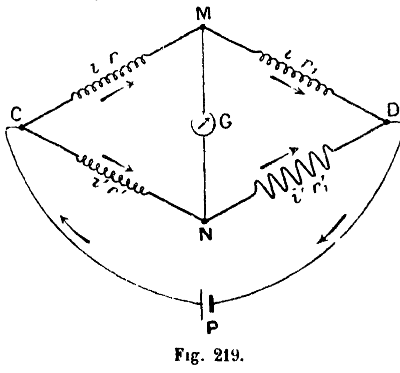


Fig. 219.

$$ir = i'r' \quad \text{et} \quad ir_1 = i'r'_1,$$

d'où :

$$\frac{r}{r_1} = \frac{r'}{r'_1}, \text{ ou } rr'_1 = r_1r'.$$

Telle est la condition d'équilibre électrique du *pont* MN

Si donc r'_1 est la résistance inconnue, il suffira de connaître les trois autres en ohms, pour pouvoir calculer r'_1.

VI. — Effets chimiques du courant électrique. Électrolyse.

238. ***Phénomènes fondamentaux.*** — Si l'on établit, entre les extrémités d'une colonne liquide, une différence de potentiel suffisante (une dizaine de volts, par exemple), l'expérience montre qu'avec certains liquides, l'eau *pure*, l'alcool, le pétrole, le sulfure de carbone, etc., il ne se produit aucun courant; ces corps se comportent comme des diélectriques. — Avec d'autres liquides, le mercure, l'étain fondu et, en général les métaux liquides, le courant passe, et il apparaît, dans le liquide conducteur, de l'énergie sous forme de chaleur de Joule. — Enfin, pour une troisième catégorie de liquides, comprenant les sels métalliques fondus, ou dissous dans l'eau, le passage du courant a également lieu : une partie de l'énergie disponible le long de la colonne liquide apparaît bien sous forme de chaleur de Joule, mais, en outre, une quantité plus ou moins grande d'énergie est employée à produire une décomposition chimique du liquide; l'expérience montre que cette décomposition et le passage du courant sont deux phénomènes connexes et qui se produisent simultanément.

Faraday a donné à cette décomposition le nom d'*électrolyse*; le liquide est un *électrolyte*, et les conducteurs, en contact avec le liquide, qui servent l'un à l'entrée, l'autre à la sortie du courant, sont les *électrodes*. On nomme *anode* l'électrode d'entrée et *cathode* l'électrode de sortie du courant; comme l'anode est à un potentiel plus élevé que la cathode, on la désigne sous le nom d'*électrode positive*, la cathode étant l'*électrode négative*. Faraday a appelé *ions* les produits de l'électrolyse. Enfin, on appelle *cuve électrolytique*, ou *voltamètre* (*), le vase contenant l'électrolyte.

Les seuls liquides qui puissent jouer le rôle d'électrolytes sont les *sels métalliques* et les *acides* dissous dans l'eau ou fondus, dont la formule chimique peut s'écrire RM, R étant un radical acide, et M représentant le métal du sel, ou l'hydrogène de l'acide. Il faut ajouter à ces corps les *hydrates métalliques basiques* dissous ou fondus, la potasse KOH et la soude NaOH, dans lesquels le groupement OH joue le même rôle que le radical acide R dans les sels (**).

(*) Ce nom lui a été donné, parce qu'on peut s'en servir pour *mesurer* l'intensité d'un courant, comme nous allons le voir un peu plus loin.

(**) Il est bon de faire remarquer que les *composés binaires* des métalloïdes, tels que H^2O, CS^2, AzO^2, PCl^3, etc., ne sont pas des électrolytes; il en est de même des *hydracides* HF, HCl, etc., lorsqu'ils sont *purs*; pour être électrolysables, les hydracides doivent être en solution aqueuse.

239. ***Lois qualitatives de l'électrolyse.*** — 1° *Un électrolyte de formule générale RM se décompose en R et M;* 2° *les produits de la décomposition apparaissent uniquement sur les électrodes et nullement dans la masse même du liquide;* 3° *l'ion M (métal ou hydrogène) descend le courant et apparaît sur la cathode; l'ion R remonte le courant et apparaît sur l'anode.*

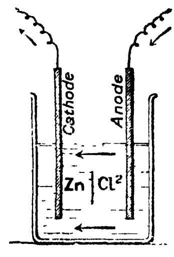


Fig. 220.

On montre sans peine l'exactitude de ces faits en électrolysant, entre deux lames de platine, du chlorure de zinc pur, $Zn\,Cl^2$, fondu (à 250°) dans un creuset ou même simplement dans un vase de verre mince (*fig.* 220). En établissant entre les deux électrodes une différence de potentiel d'une dizaine de volts, on voit se dégager des bulles de chlore sur l'anode, et la lame de platine qui sert de cathode se recouvrir d'un dépôt de zinc métallique.

240. ***Exceptions apparentes à ces lois. — Actions secondaires.*** — L'électrolyse n'a que rarement cette simplicité d'allures; le plus souvent, à cause de leurs propriétés chimiques, les produits de l'électrolyse réagissent, soit entre eux, soit sur l'électrolyte, soit sur la substance même des électrodes : on a donné le nom d'*actions secondaires* à ces réactions chimiques, consécutives à l'électrolyse proprement dite; la connaissance des propriétés chimiques de ces produits permettra, en général, de prévoir ces actions secondaires. Montrons-le par quelques exemples.

1° *Électrolyse de l'acide sulfurique étendu.* — Dans le fond d'un vase V (*fig.* 221), on a mastiqué deux électrodes de platine L, L', qui communiquent avec deux bornes B et B'. Le vase V contient de l'eau acidulée par $\frac{1}{10}$ d'acide sulfurique. Sur les électrodes, sont renversées deux éprouvettes divisées E, E', destinées à recueillir les gaz provenant de l'électrolyse. En réunissant les bornes B et B' aux pôles d'une pile de quelques éléments, on voit immédiatement des bulles gazeuses se dégager sur les électrodes, de l'*hydrogène* à la *cathode*, et de l'*oxygène* à l'*anode*; à chaque instant, le volume de l'hydrogène est double de celui de l'oxygène.

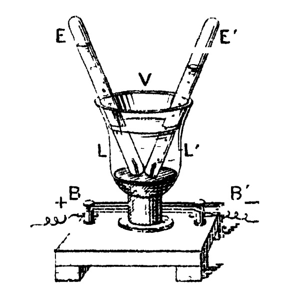


Fig. 221.

L'acide sulfurique SO^4H^2 (*fig.* 222) est décomposé en H^2 qui descend le courant, apparaît sur la cathode et se dégage; l'ion

SO^4, qui remonte le courant, est porté sur l'anode, il réagit sur l'eau de la dissolution, et donne de l'acide sulfurique SO^4H^2 et de l'oxygène

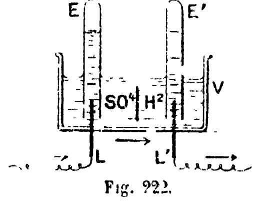


Fig. 222.

$$SO^4 + H^2O = SO^4H^2 + O.$$

L'acide sulfurique décomposé est donc régénéré, et l'oxygène se dégage. En somme, en raison de l'action secondaire de SO^4 sur l'eau de la dissolution, tout se passe comme si l'on avait décomposé de l'eau; c'est pour cela que l'on considère souvent cette électrolyse comme constituant une *analyse de l'eau* (*).

2° *Électrolyse du sulfate de sodium.* — Dans un tube en U, contenant une solution de sulfate de sodium colorée par de la teinture de mauves (**), plongent deux électrodes de platine E et E' (*fig.* 223). Si l'on fait passer un courant, on voit un dégagement gazeux se produire, de l'hydrogène apparaît à la cathode et de l'oxygène à l'anode; en même temps, le liquide rougit à l'anode et verdit à la cathode; il est facile de se rendre compte de ce qui se passe. Le sulfate de sodium SO^4Na^2 se décompose en SO^4 et Na^2; l'ion métal descend le courant et arrive sur la cathode E'; là il décompose l'eau de la dissolution, en donnant de l'hydrogène qui se dégage, et de la soude caustique qui verdit la teinture de mauves,

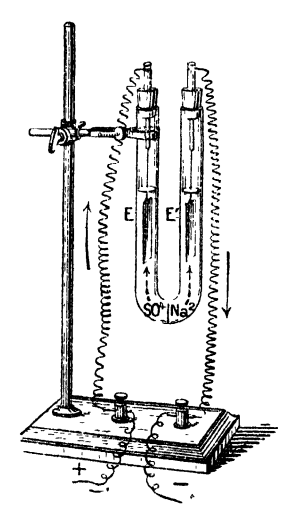


Fig. 223.

$$Na^2 + 2\,H^2O = 2\,NaOH + H^2.$$

L'ion SO^4 remonte le courant et arrive sur l'anode, où, au contact de l'eau, il donne de l'oxygène qui se dégage, et de l'acide sulfurique SO^4H^2 qui rougit la teinture de mauves.

3° *Électrolyse du sulfate de cuivre entre des électrodes en cuivre.* — *Anode soluble.* — Examinons enfin le cas de l'électrolyse du sulfate de cuivre entre des électrodes *en cuivre* : SO^4Cu est

(*) Cette expérience a été faite par Carlisle et Nicholson (1800) peu de temps après l'invention de la pile par Volta.

(**) Il suffit de faire digérer pendant quelques minutes des fleurs de mauves sèches dans une solution *neutre* de sulfate de sodium; on obtient un liquide mauve, que les acides font virer au rouge, et les bases au vert.

décomposé en SO^4 et Cu; les ions Cu se déposent sur la cathode, qui augmente de poids; les ions SO^4 se portent sur l'anode, et se combinent au cuivre dont elle est formée, pour régénérer du sulfate de cuivre SO^4Cu : la perte en cuivre de l'anode est égale au gain de la cathode; on voit donc que tout se passe comme s'il y avait simplement transport du cuivre de l'anode sur la cathode. L'anode se dissolvant ainsi peu à peu, on l'appelle *anode soluble*.

On expliquerait de même l'électrolyse de l'azotate d'argent AzO^3Ag entre deux électrodes d'*argent*.

Lorsque nous passerons en revue les applications de l'électrolyse, nous aurons l'occasion de donner d'autres exemples de ces actions secondaires.

241. ***Loi quantitative de l'électrolyse : Loi de Faraday***. — Si l'on observe un voltamètre à acide sulfurique étendu dans lequel passe un *courant constant de* 1 *ampère*, par exemple, on constate, par une simple lecture, que les volumes et, par suite, les *poids d'hydrogène mis en liberté à la cathode sont proportionnels au temps*; en 10 minutes, on recueille dix fois plus d'hydrogène qu'en une seule minute. De même, avec un voltamètre à sulfate de cuivre, le poids de cuivre déposé sur la cathode en 10 minutes est dix fois plus grand que si le dépôt a duré 1 minute.

Si l'on répète ces expériences avec des courants de 2, 3,... ampères, *les volumes d'hydrogène, les poids de cuivre mis en liberté*, par *minute* sur la cathode, deviennent eux-mêmes *deux, trois... fois plus grands* qu'avec un courant de 1 ampère.

Il résulte de là que, pour un électrolyte donné, le poids de métal déposé à la cathode est *proportionnel au temps t* et *à l'intensité I du courant*, et par suite *proportionnel au produit It*, c'est-à-dire au nombre de coulombs transportés par le courant dans le temps t; on peut donc énoncer la loi suivante due à Faraday :

Le poids de métal déposé à la cathode est proportionnel à la quantité totale d'électricité qui a traversé l'électrolyte. — Cette quantité d'électricité intervient seule pour régler le poids de métal ou d'hydrogène déposé à la cathode; les autres conditions de l'expérience, nature des électrodes, température, dimensions des appareils, continuité ou discontinuité du courant, n'ont aucune influence.

Faraday, à qui l'on doit un remarquable ensemble de recherches sur l'électrolyse, a cherché, en outre, les poids des différents métaux qui sont déposés sur la cathode, par le passage d'une quantité déterminée d'électricité dans le voltamètre; le résultat de ses expériences peut s'exprimer par une formule très simple : le *poids atomique* A d'un métal étant supposé exprimer des *grammes*, *le poids p de ce métal déposé sur la*

cathode par le passage d'un coulomb est, en grammes :

(1) $$p = \frac{1}{96\,600} \times \frac{A}{n},$$

où n est un nombre entier simple, qui dépend de la nature du métal (*), et même dans certains cas du sel du métal qui constitue l'électrolyte. Les quotients $\frac{A}{n}$ peuvent s'appeler *équivalents électrochimiques* des métaux considérés. Ils représentent les poids des divers métaux mis en liberté par une même quantité d'électricité (par 96 600 coulombs, si A est exprimé en grammes).

Voici les valeurs de A et de n pour les métaux les plus usuels :

SYMBOLE ATOMIQUE DU MÉTAL	POIDS ATOMIQUE A	VALEUR DE n.	
H	1	1	
Na. . . .	23	1	
K	39	1	
Ag. . . .	108	1	
Mg. . . .	24,3	2	
Zn . . .	66	2	
Cu. . . .	63,5	2	
Ni. . . .	58,6	2	
Hg. . . .	200	2	dans les sels mercuriques,
Fe. . . .	56	2	dans les sels ferreux, $FeCl^2$, SO^4Fe
		3	dans les sels ferriques, Fe^2Cl^6, $(SO^4)^3Fe^2$
Au . . .	196,6	3	

On peut vérifier expérimentalement la formule (1) par une expérience simple. On place à la suite l'un de l'autre, dans un même circuit, divers voltamètres à électrodes de platine, contenant l'un de l'eau acidulée par l'acide sulfurique, le deuxième une solution d'azotate d'argent, et le troisième une solution d'acétate de zinc, puis on fait passer un courant pendant une dizaine de minutes ; soit V cm³ le volume d'hydrogène recueilli, pesant, par exemple, 0,01 g ; il aura dû se déposer, en même temps, $108 \times 0{,}01 = 1{,}08$ g d'argent et $\frac{66}{2} \times 0{,}01 = 0{,}33$ g de zinc ; ce qu'on peut vérifier par la pesée des cathodes (**).

242. ***Application.*** — *On fait passer un courant de* 10 *ampères*

(*) Nous pouvons faire remarquer que ce nombre n n'est autre chose que la qualité de l'atome que l'on définira dans le Cours de Chimie, sous le nom de *valence*.

(**) On peut même vérifier que le zinc ainsi dégagé, traité par l'acide sulfurique, ou l'acide chlorhydrique, peut en déplacer précisément le même volume V d'hydrogène que celui qui a été recueilli dans le voltamètre à eau acidulée. Il suffit de détacher la cathode en platine recouverte de zinc, de la plonger dans une éprouvette divisée remplie d'eau acidulée, puis de renverser cette éprouvette dans une petite cuve à eau acidulée ; au bout de quelques instants, le zinc a disparu et on peut lire le volume de l'hydrogène dégagé : il est exactement égal à V (112 cm³ environ, si l'on avait 0,33 gr de zinc).

dans un voltamètre à eau acidulée; combien faudra-t-il de temps pour obtenir, à la cathode, 1 litre d'hydrogène?

Un litre d'hydrogène pèse 0,09 g; or pour en libérer 1 gramme, il faut 96 600 coulombs; donc pour en libérer 0,09 g il faudra $96\,600 \times 0{,}09 = 8690$ coulombs, environ; le courant débitant 10 coulombs par seconde, il lui faudra donc 869 secondes, ou 14 minutes 29 secondes pour libérer 1 litre d'hydrogène. A l'anode, on recueillerait pendant le même temps 0,5 litre d'oxygène.

243. Définition légale de l'ampère et du coulomb. — C'est à la loi de Faraday qu'on s'est adressé pour définir pratiquement les unités internationales d'*intensité de courant* et de *quantité d'électricité*. Voici ces définitions :

*L'**ampère international** est représenté en pratique par l'intensité d'un courant constant qui, traversant une solution d azotate d'argent dans l'eau, dépose l'argent à raison de* 0 001118 *gramme par seconde.*

*Le **coulomb international** est la quantité d'électricité qui, traversant un voltamètre à azotate d'argent, dépose* 0,001118 *gramme d'argent.*

244. Mesure d'une quantité d'électricité et d'une intensité de courant. — On voit immédiatement comment le voltametre à azotate d'argent pourra servir à mesurer une quantité d'électricité : il suffira de déterminer l'augmentation de poids de la cathode, produite par le passage de la quantité d'électricité à mesurer; autant de fois le poids trouvé contiendra 0,001118, autant cette quantité d'électricité vaudra de coulombs. — La mesure de l'intensité d'un courant *constant* comportera :

1° La mesure d'une quantité d'électricité Q, mesure opérée comme on vient de le dire;

2° La mesure du temps t que le courant constant a mis à transporter cette quantité d'électricité; l'intensité sera donnée par la formule :

$$\boxed{I \text{ amperes} = \frac{Q \text{ coulombs}}{t \text{ secondes}}.}$$

Remarque. — Au lieu d'employer un voltamètre à azotate d'argent, on pourrait se servir d'un voltamètre à eau acidulée; il est facile de calculer le volume d'hydrogene dégagé par minute par un courant d'un ampère. Le poids d'hydrogène dégagé sur la cathode est en grammes, pour une minute, $\frac{60}{96\,600}$, or le centimètre cube d'hydrogène pèse, à 0° et sous la pression de 76 cm de mercure, 0,00009 g, donc le volume occupé, dans ces conditions, par ce poids d'hydrogène sera :

$$\frac{60}{96\,600 \times 0{,}00009} = 6{,}90 \text{ cm}^3.$$

245. ***Relation entre la force électromotrice inverse d'un récepteur électrolytique et les réactions chimiques qui s'y produisent.*** — Toute cuve à électrolyse est un récepteur électrique : il s'y consomme de l'énergie électrique. — Considérons un circuit fermé, de résistance totale R, comprenant un générateur de force électromotrice E (227) et un récepteur électrolytique dont la force électromotrice inverse est E_1 (231); en lui appliquant la formule d'Ohm (233), on aura :

$$IR - E + E_1 = 0$$

d'où
$$I = \frac{E - E_1}{R}.$$

On voit, sur cette formule, que le circuit ne sera parcouru par un courant que si $E > E_1$; il faudra donc, *pour réaliser une électrolyse, employer un générateur de force électromotrice supérieure à celle du récepteur.*

Cherchons maintenant une *relation entre E_1, force électromotrice inverse du récepteur, et la chaleur d'origine chimique absorbée par la décomposition de l'électrolyte.* Prenons comme exemple le voltamètre à eau acidulée par l'acide sulfurique. On trouve, en somme, les produits de la décomposition de l'eau, et l'acide sulfurique reste inaltéré (240); la seule réaction qui se produise est donc :

$$H^2O \text{ liquide} = H^2 \text{ gaz} + O \text{ gaz}.$$

Or, on connaît, par des mesures calorimétriques, le nombre de calories dégagées dans la formation de l'eau liquide à partir de l'hydrogène et de l'oxygène, pris à l'état gazeux ; pour $H^2O = 18$ g, c'est 69 000 calories, donc, pour ramener 18 g d'eau liquide à l'état d'hydrogène et d'oxygène gazeux, il faudra leur fournir 69 000 calories; par suite, l'apparition de 1 g d'hydrogène à la cathode correspondra à l'absorption de 34 500 calories qui, d'après ce qu'on a vu plus haut (224), équivalent à

$$34\,500 \times 4{,}18 = 144\,210 \text{ joules.}$$

D'ailleurs, pour mettre en liberté 1 g d'hydrogène, il faut faire passer, dans le voltamètre, 96 600 coulombs, et si E_1 est la force électromotrice inverse du récepteur, ils y abandonneront

$$96\,600 \times E_1 \text{ joules.}$$

Écrivons, en appliquant le principe de la conservation du travail, que ce travail est précisément égal à celui qui a été nécessaire pour décomposer 9 g d'eau; il viendra

$$96\,600.\ E_1 = 144\,210$$

d'où
$$E_1 = 1{,}49 \text{ volt.}$$

Ainsi, pour électrolyser de l'eau acidulée dans un voltamètre à électrodes en platine, la force électromotrice du générateur devra être supérieure à 1,49 volt (*). — On trouverait évidemment le même résultat pour tout voltamètre dans lequel, l'électrolyte gardant la même composition, il ne se dégagerait que les éléments de l'eau.

En appliquant ce raisonnement à un voltamètre à sulfate de cuivre, avec électrodes en cuivre, on trouve $E_1 = 0$, puisqu'il ne se produit finalement

(*) L'expérience vérifie parfaitement cette conséquence du principe de la conservation du travail.

aucune réaction chimique; par suite, dans un tel voltamètre, l'énergie absorbée est uniquement de la chaleur de Joule, et a pour valeur I^2r par seconde, r étant la résistance du voltamètre. — D'une manière générale, on devrait avoir, pour un récepteur électrolytique quelconque,

$$(1) \qquad E_1 = \frac{4,18}{96\,000} \cdot \frac{Q}{n},$$

Q étant le nombre de calories absorbées par la *totalité* des réactions chimiques effectuées dans le voltamètre, et à la suite desquelles le poids atomique A grammes du métal apparaît sur la cathode, et n étant le nombre par lequel il faut diviser A pour obtenir l'équivalent électrochimique de ce métal (241).

Remarque. — Il est essentiel de faire remarquer que cette formule, due à Lord Kelvin, n'est malheureusement pas souvent applicable; pour l'obtenir, nous avons supposé que, dans le voltamètre, en dehors de la chaleur de Joule, l'électrolyse est la seule cause mettant en jeu de l'énergie; cette hypothèse n'est exacte que dans un petit nombre de cas. L'expérience montre, en effet, que le voltamètre, pris dans son ensemble, est parfois le siège d'un dégagement de chaleur notablement supérieur à celui qui est dû à l'effet Joule, dans d'autres cas, au contraire, il lui est inférieur, et le voltamètre peut même se refroidir au-dessous de la température ambiante, il en résulte que, dans ces cas, il y a de l'énergie mise en jeu par d'autres causes que l'électrolyse(*). Alors, la formule (1) ne pourra plus être utilisée pour le *calcul a priori* de E_1 · pour connaître cette force électromotrice, il faudra recourir à l'*expérience* · on mesurera la différence de potentiel ($V_1 - V'_1$) aux bornes du voltamètre, sa résistance r et l'intensité I du courant qui le traverse; la formule

$$E_1 = V_1 - V'_1 - Ir$$

indiquée plus haut (231) permettra de trouver la valeur de E_1.

246. *Dissociation électrolytique*. — ***Hypothèse de M. Arrhenius.*** — Le fait très curieux que les produits de la décomposition électrolytique n'apparaissent que sur les électrodes, et non dans la masse de l'électrolyte, a suscité différentes hypothèses, destinées à en donner une explication plausible. La plus récente, due à M. Arrhenius, professeur à l'Université de Stockholm, rend compte, non seulement de ce fait, mais encore de diverses propriétés remarquables des électrolytes.

M. Arrhenius admet que *les électrolytes dissous dans l'eau ou fondus sont décomposés d'une façon plus ou moins complète, ou dissociés en ions*; la proportion de sel non décomposé est d'autant plus faible que la solution est plus étendue. Ainsi, une solution étendue de sel marin ne contiendrait que peu de sel, mais elle contiendrait un mélange des *ions chlore* et des *ions sodium*, fortement chargés d'électricité, *négative* pour les *ions chlore*, *positive* pour les *ions sodium*. Si ces ions ainsi mélangés ne réagissent pas sur l'eau de la

(*) Il résulte d'expériences nombreuses que c'est sur les surfaces de contact des électrodes avec l'électrolyte que ces causes se trouvent localisées.

solution, c'est que, dans cet état, leurs propriétés chimiques seraient profondément modifiées, par exemple, par leur état d'électrisation. M. Arrhenius admet, en outre, que la quantité de sodium représentée par $\frac{A}{n}$, c'est-à-dire 23 g de sodium (241), porte avec elle une charge positive de 96 600 coulombs. — Si l'on plonge, dans une telle solution, deux électrodes à des potentiels différents, il va s'y créer un champ électrique (156) : les ions sodium, positifs, seront attirés vers la cathode, qui est au plus bas potentiel, tandis que les ions chlore, négatifs, iront sur l'anode qui est au potentiel le plus élevé. Ce seraient donc les ions qui transporteraient l'électricité (96 600 coulombs par 23 g de sodium) à travers l'électrolyte : ainsi s'expliqueraient le passage du courant et les phénomènes d'électrolyse. Les ions, déchargés par les électrodes, perdraient leur qualité d'ions; ils reprendraient leurs propriétés chimiques ordinaires, et donneraient alors lieu aux actions secondaires de l'électrolyse, qui en sont la conséquence chimique.

Quant aux corps non électrolysables, ce seraient ceux qui ne subissent pas la dissociation électrolytique par dissolution ou par liquéfaction.

VII. — Générateurs électriques consommant de l'énergie chimique Piles hydro-électriques.

247. *Loi du contact, ou loi de Volta.* — Nous avons trouvé, par l'expérience (165), que le potentiel a la même valeur en tous les points d'un conducteur en équilibre électrique : il n'en est réellement ainsi que si *le conducteur est homogène*, c'est-à-dire formé d'une seule et même substance. Si, au contraire, un conducteur est formé de *deux métaux différents en contact*, cuivre et zinc, par exemple, le potentiel est constant sur le cuivre; il est également constant dans toute l'étendue du zinc, mais n'a pas la même valeur que sur le cuivre : l'expérience suivante permet de s'en assurer facilement. Un électroscope condensateur (*fig.* 224) porte un plateau de cuivre A, verni sur sa face supérieure, sur lequel on pose un autre plateau de zinc B verni sur sa face inférieure : on réunit les deux faces non vernies par un fil de cuivre *f*, protégé du contact des doigts par une couche épaisse de gutta ou de paraffine; puis on supprime le fil, et on enlève le plateau B : les feuilles d'or divergent, et l'on reconnaît que l'appareil est chargé négativement. Le conden-

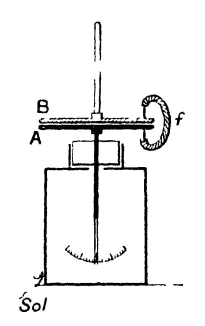


Fig. 224.

sateur AB était donc chargé; par suite, ses armatures étaient à des potentiels différents, et comme il est resté sur l'électroscope de l'électricité négative, c'est que l'armature de cuivre A était à un potentiel moins élevé que l'armature de zinc B. On vérifierait d'ailleurs sans peine que le plateau de zinc est chargé positivement.

De la divergence des feuilles, on pourra déduire approximativement la différence de potentiel qui existait entre les deux armatures A et B; des mesures faites avec un appareil plus précis ont montré qu'elle vaut à peu près 0,8 volt. — En répétant cette expérience avec d'autres métaux, on trouve des résultats analogues; de plus, la divergence des feuilles, pour chaque couple de métaux, est indépendante de l'étendue de la surface de contact : que le contact ait lieu par un point ou par une large surface, le résultat est le même.

La première idée de ces expériences est due à Volta; c'est à la suite d'expériences faites par Volta lui-même, et par divers autres physiciens, qu'il a été amené à énoncer la loi suivante, connue sous le nom de *loi de Volta*, ou *loi du contact* :

Le contact de deux métaux, et plus généralement de deux corps différents quelconques, suffit pour établir entre eux une différence de potentiel, qui ne dépend que de leur nature et de leur température. Elle est indépendante de la grandeur et de la forme des surfaces en contact, et aussi de la valeur absolue du potentiel de l'un d'eux.

248. ***Force électromotrice de contact.*** — Considérons une tige LL′ formée d'une baguette de zinc LO et d'une baguette de cuivre OL′ ajustées bout à bout (*fig.* 225); si l'on emploie le procédé graphique déjà indiqué (209) pour représenter le potentiel le long d'un conducteur, la droite AB figurera que le potentiel est constant sur le zinc; la droite A′B′ figurera également la constance du potentiel sur le cuivre, le long de OL′, et BA′ représentera la chute brusque qu'éprouve le potentiel à la surface de séparation. Les deux métaux étant primitivement neutres, le seul fait de les mettre en contact a déterminé un mouvement d'électricité positive du cuivre vers le zinc, et, par suite, un mouvement d'électricité négative en sens inverse; tout se passe donc comme si *le contact avait créé une force électromotrice*; en raison des charges ainsi développées, il s'est produit, entre les deux métaux, une différence de potentiel, mesurable à l'électromètre, qui finit par faire équilibre à la force électromotrice (cette différence de potentiel tendrait, en effet, à pousser

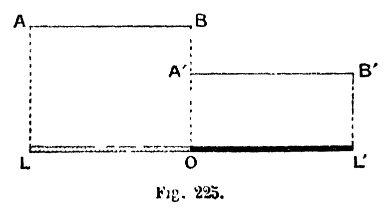


Fig. 225.

l'une vers l'autre les charges du zinc et du cuivre) : c'est là, au moins, une manière de se représenter les phénomènes.

249. *Loi des contacts successifs.* — Si, dans l'expérience citée plus haut (*fig.* 224), on substitue au fil de cuivre *f* un fil métallique quelconque, *la différence de potentiel observée reste la même*; il en est encore de même, si l'on remplace ce fil de cuivre *f* par un fil formé de différents métaux soudés bout à bout, pourvu que toutes les surfaces de contact soient à une même température. Ce fait s'énonce sous la forme suivante, qui constitue une seconde loi, également due à Volta : *Lorsque plusieurs métaux, à la même température, sont soudés les uns aux autres de manière à former une chaîne continue, la différence de potentiel entre les deux métaux qui terminent la chaîne est la même que si ces deux métaux étaient directement en contact, sans intermédiaire.*

Il résulte de cette loi et de la loi du contact, une conséquence très importante : *Si les métaux qui terminent la chaîne sont identiques, les deux extrémités sont au même potentiel.*

250. *Exception à la loi des contacts successifs, pour une chaîne de conducteurs contenant un électrolyte. — Couple ou élément de Volta.* — La loi des contacts successifs n'est plus vérifiée lorsque, dans la chaîne des conducteurs, on vient à intercaler un *conducteur électrolytique*; si alors, en particulier, les deux métaux extrêmes sont identiques, *ils peuvent parfaitement ne pas être au même potentiel.*

Formons, en effet, la chaîne suivante de conducteurs

Cuivre | Zinc pur (*) | Acide sulfurique étendu | Cuivre,

en plongeant une lame de cuivre L′ et une lame de zinc L dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique (*fig.* 226) : l'expérience montre qu'*il s'établit alors une différence de potentiel entre les fils de cuivre* A et B *qui terminent les lames*. Pour le constater, il suffit de mettre en communication le fil A avec le plateau supérieur d'un électroscope condensateur (192), et le fil B avec le plateau inférieur; si, après avoir supprimé les communications, on soulève le plateau supérieur, les feuilles d'or divergent : leur charge est *négative*. Si l'on intervertit les communications, les feuilles de l'électroscope acquièrent une charge *positive*.

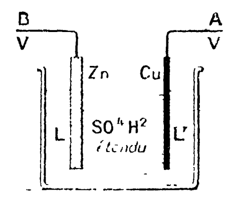


Fig. 226.

L'ensemble constitué par les deux fils, les deux lames et le liquide

(*) A défaut de zinc pur, souvent difficile à se procurer, il revient au même, en pratique, d'employer du zinc amalgamé, c'est-à-dire allié avec un peu de mercure.

interposé, constitue un *couple électrique* ou *élément de Volta* : le fil A est le *pôle positif*; le fil B, fixé au zinc, est le *pôle négatif* (*); la lame de zinc est l'*électrode négative* et la lame de cuivre l'*électrode positive de l'élément.*

Si l'on appelle v, v', v'', les variations de potentiel, du cuivre au zinc, du zinc à l'eau acidulée. et de ce liquide au cuivre, on voit que, pour une valeur V du potentiel sur le fil B, les potentiels successifs sont : $V + v$ sur le zinc, $V + v + v'$ dans l'eau acidulée, $V + v + v' + v'' = V'$ sur le cuivre et sur le fil A. Mais, ainsi qu'il vient d'être dit, la différence des potentiels extrêmes, $V' - V$, que nous représenterons par e, n'est plus nulle, comme elle le serait dans une chaîne formée exclusivement de métaux (249); les expériences de mesures électrométriques montrent qu'elle est d'environ 0,85 volt (**).

Cette différence de potentiel e, qui d'après la loi de Volta (247) ne dépend que de la nature des substances au contact, est *caractéristique* du couple ou de l'élément; en d'autres termes, quelle que soit la valeur du potentiel V, le potentiel V′ lui est toujours supérieur de e volts; la forme et les dimensions du couple n'ont aucune influence sur la valeur de e.

251. ***Pile de Volta.*** — Prenons maintenant un certain nombre de couples semblables; réunissons le pôle négatif du premier avec le pôle positif du deuxième, le pôle négatif du deuxième au pôle positif

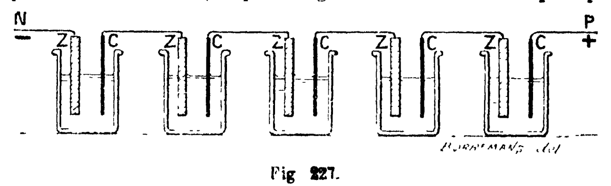


Fig 227.

du troisième, et ainsi de suite (*fig.* 227). Nous aurons ainsi formé une *pile de Volta* (***). Il est aisé de voir qu'en passant du pôle négatif

(*) On dit souvent, d'une manière abrégée, mais incorrecte, que *le zinc* lui-même est *le pôle négatif*.

(**) Dans le couple de Volta, on a vu (247) que le premier terme v a pour valeur 0,8 volt; la somme algébrique des trois termes $v + v' + v''$ étant de 0,85 volt, il en résulte que la somme algébrique des deux derniers $v' + v''$ est de 0,05 volt; elle est donc très faible, et pour cette raison avait échappé à Volta; il considérait alors le liquide comme ayant pour effet d'égaliser le potentiel des deux lames métalliques qui y sont plongées.

(***) C'est à Pavie, en 1795, que Volta construisit, pour la première fois, une pile électrique; l'appareil original, dont l'intérêt est purement historique, était monté de la manière suivante. Sur un socle isolant (*fig.* 228), on plaçait un disque de zinc Z, une rondelle de drap imprégnée d'eau acidulée, et un disque de cuivre; on répétait un certain nombre de fois la même succession, et on terminait par un disque de

au pôle positif d'un même élément, le potentiel augmente de e; et par suite, s'il y a, par exemple, cinq éléments, la différence de potentiel entre les deux extrémités de la chaîne sera $5e$ volts ; en général, si n est le nombre des éléments, la différence de potentiel aux deux extrémités de la chaîne sera égale à ne. On dit que de tels éléments sont *couplés* ou *montés en série*.

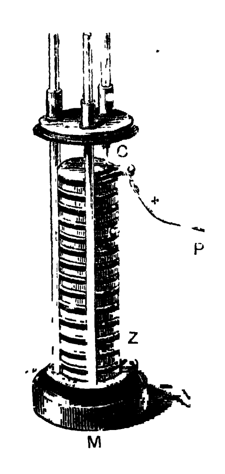


Fig. 228

Si le pôle négatif N de la chaîne communique avec le sol, son potentiel est égal à zéro, et le potentiel du pôle positif P sera égal à ne. Si le nombre des éléments est pair, et qu'on mette au sol le milieu de la chaîne, les potentiels en P et N sont respectivement $+\frac{n}{2}e$ et $-\frac{n}{2}e$. — On voit sans peine comment l'électromètre permettrait d'établir ces diverses propriétés.

252. ***La pile de Volta est un générateur électrique. — Force électromotrice de la pile. — Rendement électrique de la pile.*** — Si l'on réunit par un fil métallique PAN les deux pôles de la pile (*fig.* 229), *le fil sera parcouru par un courant* allant, dans le fil, du pôle positif au pôle négatif. On aura donc réalisé un circuit fermé, et le courant ira du zinc au cuivre, *à travers le liquide électrolytique*; l'acide sulfurique sera électrolysé (240) ; les ions H^2 apparaîtront *sur la lame de cuivre*, où ils se dégageront (**); les ions SO^4 se porteront *sur le zinc*, et, par suite d'une action secondaire, il se formera du sulfate de zinc. Donc, en somme, il y aura, dans la pile, dégagement d'hydro-

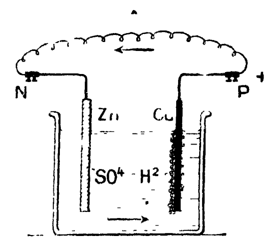


Fig. 229.

cuivre. Au premier disque de zinc était fixé un fil de cuivre N : c'était le *pôle négatif* de la pile. Au dernier disque de cuivre était fixé un autre fil de cuivre P : c'était le *pôle positif*. Il est aisé de voir que la disposition des diverses parties de la pile ainsi construite correspond exactement à celle de la figure 227. — C'est cette disposition, de disques empilés les uns sur les autres, qui a été l'origine de l'expression de *pile électrique*.

(**) Le dégagement d'hydrogène ne se produit que si le circuit est fermé, il est nul en circuit ouvert; il est donc bien déterminé par le passage du courant. Avec le zinc ordinaire du commerce, qui contient des métaux étrangers, inégalement distribués en différents points, l'expérience montre que, même quand le circuit n'est pas fermé par un conducteur extérieur, il y a dégagement d'hydrogène sur ces métaux, c'est-à-dire attaque du zinc.

gène, et formation de sulfate de zinc, conformément à l'équation :

$$SO^4H^2 + Zn = SO^4Zn + H^2.$$

Soient E la force électromotrice de la pile considérée comme générateur électrique (227), r la *résistance intérieure* de l'élément (résistance de la portion de circuit limitée aux bornes P et N (*fig.* 229), et comprenant la pile), et R la résistance du conducteur interpolaire, *que nous supposerons ne pas contenir de récepteur ayant une force électromotrice inverse*; l'intensité I du courant sera donnée par la formule d'Ohm (233)

$$(1) \qquad E - I(R + r) = 0, \text{ d'où } I = \frac{E}{R + r}.$$

Or, on sait mesurer R et r (237); si, d'autre part, on mesure I, au moment où l'on ferme le circuit, on aura tous les éléments nécessaires au calcul de E. La valeur de E ainsi calculée *est égale à e, différence de potentiel qui existe entre les pôles quand le circuit n'est pas fermé*. C'est pour cette raison que l'on donne souvent à la différence de potentiel e le nom de *force électromotrice de la pile en circuit ouvert*.

Mais, comme nous l'avons fait déjà remarquer (227), la différence de potentiel E′ aux bornes, *en circuit fermé*, est plus petite que e ou E; elle a en effet pour valeur d'après la loi d'Ohm

$$(2) \qquad E' = IR = E - Ir.$$

Le rapport $\frac{E'}{E}$ est ce que nous avons appelé (227) le *rendement électrique* du générateur, dans le cas de la pile, il a pour expression

$$\frac{E'}{E} = \frac{E - Ir}{E} \text{ ou } 1 - \frac{r}{E} I.$$

Ce rendement augmente à mesure que l'intensité du courant décroît; cela signifie que l'on utilise une fraction d'autant plus grande de l'énergie chimique mise en jeu dans la pile, que l'intensité du courant est plus faible, et, par suite, que le travail accompli par seconde dans le circuit extérieur est lui-même plus petit. Si l'intensité devient très faible (*), le rendement est sensiblement égal à l'unité.

253 ***Puissance de la pile. — Puissance du courant dans le circuit extérieur.*** — La *puissance* de la pile, considérée comme un générateur électrique (227), est *l'énergie qu'elle communique par seconde, à l'électricité qui la traverse*. Si E est la force électromo-

(*) Pour avoir une intensité faible, on peut soit augmenter la résistance du circuit extérieur, soit opposer à la pile un récepteur ayant une force électromotrice inverse de celle de la pile.

trice de la pile et I l'intensité du courant qu'elle fournit, dans des conditions déterminées, la puissance aura pour expression

$$P = EI \text{ watts.}$$

Soient de plus E' la différence de potentiel aux bornes de la pile, et r sa *résistance intérieure*; l'équation (2) de la page précédente nous donne

$$(3) \qquad I = \frac{E - E'}{r}.$$

La puissance du courant dans le *circuit extérieur* sera donc, par définition,

$$P' = E'I = \frac{E'(E - E')}{r} \text{ watts,}$$

à cause de l'équation (3).

Cherchons dans quelles conditions il faut se placer pour rendre P' maximum, c'est-à-dire pour avoir, avec une pile donnée, le *maximum d'énergie disponible par seconde dans le circuit extérieur.* On voit que le dénominateur de P' est constant, et que le numérateur est le produit de deux facteurs dont la somme est égale à la force électromotrice de la pile, c'est-à-dire constante; ce produit sera maximum quand les deux facteurs seront égaux; alors on aura

$$(4) \qquad E' = E - E', \text{ ou } E = 2E'.$$

Comme la puissance extérieure disponible maximum P'_m a pour expression

$$P'_m = E'I,$$

et que d'après (3) et (4). on a $I = \frac{E}{2r}$ et $E' = \frac{E}{2}$, il vient :

$$P'_m = \frac{E}{2} \cdot \frac{E}{2r} = \frac{E^2}{4r}.$$

Cette quantité est une constante caractéristique de la pile : elle represente le quart de la puissance du courant obtenu en fermant la pile sur elle-même, ou, comme l'on dit. en la mettant en *court-circuit.*

Cas particulier. — Supposons que le circuit extérieur ne contienne que *des récepteurs dans lesquels il se produise uniquement de la chaleur de Joule*, tels que des lampes à incandescence, ou des appareils de chauffage : il est facile de montrer que, si l'on veut avoir le maximum de puissance utilisable dans le circuit extérieur, la résistance R du circuit extérieur devra être égale à la résistance intérieure de la pile; en effet, égalons les deux expressions de l'intensité

données par les équations (1) et (3); en tenant compte de l'équation (4), il vient

$$\frac{2E'}{R+r} = \frac{E'}{r}$$

d'où l'on dire immédiatement $R + r = 2r$, ou $R = r$. Mais *cette conclusion serait en défaut si le circuit extérieur contenait un récepteur à force électromotrice inverse* (voltamètre, moteur, etc....)

254. ***Origine de l'énergie électrique de la pile de Volta.*** — On peut se demander quelle est l'origine de l'énergie de la pile de Volta. Or la réaction chimique

$$SO^4H^2 + Zn = SO^4Zn + H^2$$

dégage, quand on la réalise dans un calorimètre, un nombre de calories égal à 24800 pour chaque gramme d'hydrogène mis en liberté; d'autre part, il résulte d'expériences dues à Favre, que, déduction faite de la chaleur produite en vertu de la loi de Joule, à l'intérieur de l'élément Volta, le nombre de calories mises en liberté pendant qu'il s'y dégage un gramme d'hydrogène n'est que de 5000 environ, c'est-à-dire à peu près $\frac{1}{5}$ seulement de 24800, les $\frac{4}{5}$ restants (qu'on retrouve d'ailleurs dans le circuit total sous forme de chaleur de Joule) doivent donc être considérés comme représentant l'équivalent, en chaleur, de l'énergie chimique consommée dans l'élément de Volta, et transformée en énergie électrique.

255. ***Affaiblissement progressif du courant d'une pile de Volta. — Polarisation de la pile.*** — Supposons qu'on utilise le courant fourni par une pile de Volta pour électrolyser de l'azotate d'argent, dans un voltamètre à *électrodes en argent*, c'est-à-dire sans force électromotrice inverse (245). Si, au bout d'une heure, l'on détermine l'augmentation de poids de la cathode, on trouve qu'elle est loin d'être 6 fois plus grande qu'au bout des 10 premières minutes; par suite, la quantité d'électricité transportée par le courant n'est pas proportionnelle au temps; le courant n'a donc pas une intensité uniforme. Un ampèremètre, intercalé dans le circuit, indique d'ailleurs que l'intensité du courant diminue et finit par devenir à peu près nulle. — Si l'on mesure alors, *à l'électromètre*, la différence de potentiel aux bornes, *après avoir ouvert le circuit*, on trouve qu'elle est sensiblement nulle. Si l'on abandonne la pile à elle-même, en circuit ouvert, pendant quelque temps, un quart d'heure, par exemple, et surtout si l'on agite le liquide, la pile reprend sa force électromotrice primitive. La pile subit donc, par le passage même du courant, une modification qui diminue temporairement sa force électromotrice, et peut même l'annuler : on dit alors que la pile est *polarisée*.

Cette diminution de la force électromotrice ne peut être due qu'à

une modification de la nature des contacts; or le contact Zn | SO^4H^2 ne change pas; quant au contact SO^4H^2 | Cu, le dégagement d'hydrogène sur la surface de la lame de cuivre doit certainement le modifier, et c'est par suite de cette modification que la force électromotrice de la pile se trouve progressivement réduite à 7[illegible].

Pour remédier à ce défaut de la pile de Volta, il suffira donc d'empêcher le dégagement d'hydrogène sur la lame de cuivre.

256. ***Piles non polarisables.*** — Un procédé simple pour atténuer, ou même éviter le dégagement d'hydrogène, consiste à ajouter au liquide de la pile une substance oxydante, dont l'oxygène brûlera l'hydrogène, au lieu de le laisser se dégager : c'est cette solution qui a été adoptée dans l'*élément au bichromate de potassium* et dans l'*élément Leclanché*.

Élément au bichromate. — La substance dépolarisante est du bichromate de potassium $Cr^2O^7K^2$, que l'on ajoute à l'eau acidulée. L'électrode négative est toujours une lame de zinc amalgamé, placée entre deux plaques de charbon des cornues qui constituent l'électrode positive, et remplacent la lame de cuivre. — Quand le circuit est fermé, l'hydrogène provenant de l'électrolyse de l'acide sulfurique réagit sur le bichromate, dont il réduit l'acide chromique (*). La polarisation, si elle n'est pas complètement évitée, est au moins fortement atténuée.

L'élément au bichromate est représenté sous sa forme habituelle par la figure 230. — Les deux lames de charbon C, C′, sont portées par une plaque annulaire de cuivre, fixée sous une plaque isolante en ébonite; cette plaque d'ébonite sert de couvercle à un vase de verre V contenant la solution acide de bichromate. La lame de zinc est portée par une tige B, qui coulisse dans un tube de cuivre ajusté sur le couvercle; on peut donc à volonté plonger le zinc dans le liquide ou l'en retirer. Deux bornes A et A′ reliées, l'une à la tige B, l'autre à la plaque de cuivre qui porte les charbons, constituent les pôles de cette pile.

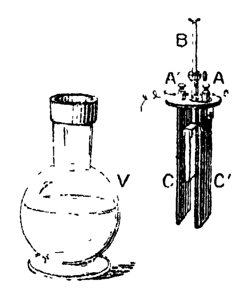


Fig. 230.

La composition du liquide est habituellement la suivante : dans 1 litre d'eau, on ajoute 250 grammes d'acide sulfurique et 120 grammes de bichromate de potassium. — La force électromotrice en circuit ouvert est de 2 volts; pour un

(*) La formule suivante représente l'ensemble des réactions qui se produisent

$$Zn + 7\,SO^4H^2 + Cr^2O^7K^2 = [SO^4K^2 + (SO^4)^3Cr^2] + 3\,SO^4Zn + 7H^2O$$

(alun de chrome)

élément d'un litre, la résistance intérieure n'est guère que d'un centième d'ohm (*).

Elément Leclanché. — Le couple de la *pile Leclanché* (*fig.* 231) est *à dépolarisant solide* (bioxyde de manganèse). Il comprend, d'une part, un bâton de zinc amalgamé Z, plongeant dans un vase V qui contient une solution concentrée de chlorure d'ammonium; d'autre part, un prisme de charbon C, placé au milieu d'un mélange de coke et de bioxyde de manganèse, dans un vase poreux T percé de quelques trous. — Lorsque le circuit extérieur est fermé, le chlorure d'ammonium est décomposé par le courant qui, dans la pile, va du zinc au vase poreux. Les ions AzH^4 se portent sur l'électrode positive; et, par suite d'une action secondaire, de l'ammoniaque AzH^3 se dissout dans le liquide, et l'hydrogène H est brûlé par l'oxygène du bioxyde de manganèse; les ions Cl apparaissent sur l'électrode en zinc, et donnent du chlorure de zinc. — Mais le dépolarisant solide réagit assez lentement sur l'hydrogène, et la polarisation n'est que partiellement évitée. Pour cette raison, l'emploi de cette pile est surtout avantageux quand on n'a besoin que d'un service intermittent (sonneries, etc.).

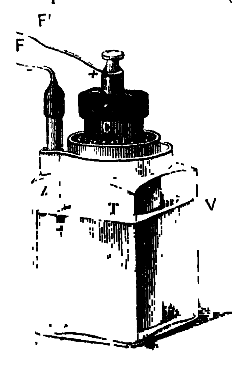


Fig. 231.

L'élément Leclanché a une force électromotrice de 1,46 volt; il est assez résistant, en raison de la présence du vase poreux (5 à 6 ohms pour les modèles ordinaires); aussi, dans divers modèles récents, on supprime le vase poreux, et l'on donne à la lame de zinc la forme d'un manchon fendu, qui enveloppe un cylindre en charbon aggloméré avec du bioxyde de manganèse; de cette manière, la résistance intérieure tombe à une fraction d'ohm.

257. ***Piles à deux liquides.*** — La polarisation de la pile peut être complètement évitée, en astreignant chaque électrode métallique à n'être en contact qu'avec une dissolution d'un de ses sels. — Tel est le cas de l'élément Daniell.

Élément Daniell. — L'électrode négative est une lame de zinc amalgamé, plongeant dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique ou dans une solution de sulfate de zinc; l'électrode positive est une lame de cuivre plongeant dans une solution saturée de sulfate de

(*) Il est évident que la résistance intérieure d'une pile est d'autant plus faible que les électrodes ont une surface plus grande, et que l'épaisseur du liquide interposé entre les électrodes est elle-même plus petite.

cuivre; les deux liquides occupent deux compartiments d'un même vase, et sont en contact par l'intermédiaire d'une cloison poreuse quelconque (membrane animale ou végétale, porcelaine dégourdie, etc.). Quand le circuit est fermé (*fig.* 232), les deux liquides sont électrolysés; les ions Cu du sulfate de cuivre se déposent sur la lame de cuivre; les ions SO^4 se portent à la surface de contact des liquides; là, ils rencontrent l'hydrogène qui provient de l'électrolyse de l'acide sulfurique, et réagissent sur lui pour régénérer l'acide; quant aux ions SO^4, provenant de l'acide, ils remontent le courant, se portent sur la lame de zinc, et donnent du sulfate de zinc; il y a, en somme, substitution du zinc de l'électrode au cuivre du sulfate de cuivre. — Les dégagements gazeux sont donc absolument évités; la nature des contacts entre les électrodes et les liquides reste exactement la même; et, de fait, cette pile garde sa force électromotrice constante tant que la solution de sulfate de cuivre garde sa concentration.

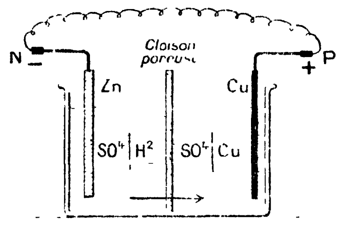


Fig. 232.

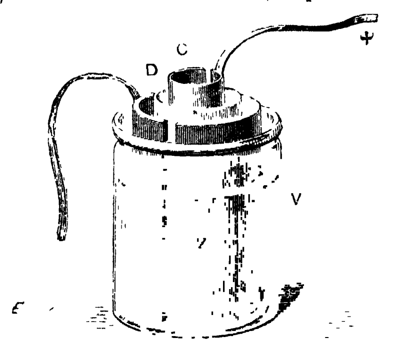


Fig 233.

Des dispositifs très variés ont été employés dans le montage de l'élément Daniell; la figure 233 représente le plus habituel; C est la lame de cuivre et Z la lame de zinc. — La force électromotrice de cet élément est d'environ 1,08 volt. Sa résistance est assez grande à cause du vase poreux (*); elle est de 7 à 8 ohms pour les éléments de dimensions moyennes

(*) Dans la *pile Callaud*, en usage dans l'Administration des Télégraphes et sur les lignes de chemins de fer, *on supprime le vase poreux*. — On se contente de placer des cristaux de sulfate de cuivre au fond d'un vase qui contient de l'eau faiblement acide : la solution saturée de sulfate de cuivre reste toujours sensiblement à la partie inférieure, en raison de sa grande densité. La lame de zinc, dont la hauteur est à peine égale à la moitié de celle du vase, est suspendue par trois crochets au bord du vase. Le fil de cuivre, protégé par une gaine isolante de gutta-percha dans toute sa partie descendante, se termine par une spirale horizontale de même métal, placée au voisinage des cristaux. — Cette pile a l'avantage d'être économique, et de n'offrir au courant qu'une faible résistance.

(vase extérieur d'un litre); elle varie d'ailleurs avec la nature de la cloison poreuse.

Élément Bunsen. — Enfin, nous signalerons encore l'élément Bunsen. Le vase poreux contient de l'acide azotique; dans ce liquide, plonge un cylindre de charbon aggloméré C, auquel est adapté le fil de cuivre qui constitue le pôle positif (*fig.* 234). Le pôle négatif est toujours un fil de cuivre, fixé à une lame de zinc amalgamé Z qui plonge dans l'eau acidulée par l'acide sulfurique. — Quand le circuit est fermé, l'hydrogène provenant de l'électrolyse de l'acide sulfurique agit sur l'acide azotique, auquel il enlève une partie de son oxygène pour former de l'eau. L'acide azotique est ainsi transformé en produits nitreux (*), en sorte que le liquide du vase D éprouve un changement progressif dans sa composition; d'autre part, on ne prend aucune précaution contre la disparition graduelle de l'acide sulfurique libre : aussi la pile de Bunsen ne peut-elle être considérée comme restant sensiblement constante que pendant quelques heures.

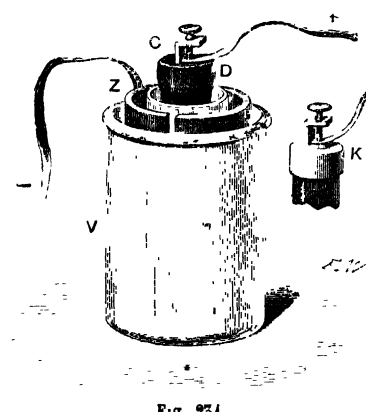


Fig. 234.

Sa force électromotrice, quand elle est récemment montée, est d'environ 1,8 volt par couple; c'est presque le double de la force électromotrice de l'élément Daniell. — Sa résistance est très faible, et n'atteint qu'une fraction d'ohm pour un élément de dimensions moyennes.

258. ***Capacité d'une pile.*** — On appelle *capacité d'un élément de pile*, la quantité totale d'électricité qu'il peut fournir quand on le fait fonctionner jusqu'à épuisement; cette capacité s'exprime habituellement en ampères-heure. Ainsi, quand on dit que la capacité d'un élément Leclanché, contenant un demi-litre d'une solution saturée de chlorure ammonique, est de 60 ampères-heure, cela signifie qu'il peut fournir $60 \times 3600 = 216\,000$ coulombs avant son complet épuisement. — Si l'on connaît le poids d'électrolyte contenu dans une pile, la loi de Faraday (241) permet de calculer sans peine la capacité de cette pile.

259 ***Étalons de force électromotrice*** — C'est au moyen d'éléments

(*) Ces produits nitreux, qui sont gazeux, se dégagent; aussi la pile de Bunsen ne peut-elle guère être montée dans une salle fermée.

de piles convenablement choisis, et construits suivant des règles précises, que l'on réalise, dans les laboratoires, *des étalons de force électromotrice* ayant une valeur connue, en volts. — L'un des plus répandus est l'élément Clark, qui comprend les contacts suivants :

Mercure	Sulfate mercureux SO^4Hg^2	Sulfate de zinc	Zinc	Mercure

La figure 235 représente l'un des dispositifs adoptés. Deux fils de platine f, f', soudés dans le verre, constituent les pôles de l'élément. — La force électromotrice de cet élément est, en circuit ouvert, 1,434 volt, à la température de 15° centigrades. — Une telle pile ne doit *jamais être mise en circuit fermé.*

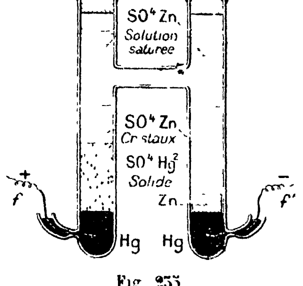


Fig 235

260. ***Définition légale du volt international.*** — L'unité de force électromotrice est le ***volt international***, c'est *la force électromotrice qui appliquée d'une manière constante à un conducteur dont la résistance est d'un ohm international y soutient un courant ayant pour intensité un ampère international. Cette unité est représentée avec une exactitude suffisante pour les besoins de la pratique, par la fraction* $\frac{1000}{1434}$ *de la force électromotrice de l'élément Clark, à la température de* 15° *centigrades.*

VIII. — Accumulateurs.

261. ***Polarisation des électrodes du voltamètre.*** — Nous avons vu (255) que, dans la pile de Volta, le passage du courant détermine la polarisation progressive de l'électrode en cuivre, à cause de la modification du contact provenant du dégagement d'hydrogène; tout se passe comme s'il y avait eu création, dans la pile, d'une force électromotrice inverse (231).

Ce fait n'est pas spécial à la pile de Volta. Prenons un voltamètre à eau acidulée, avec des électrodes en platine; l'appareil est symétrique; la différence de potentiel est nulle entre les deux électrodes. Faisons passer, dans ce voltamètre, un courant fourni par une pile ayant une force électromotrice de quelques volts; on voit se dégager l'oxygène à l'anode, et l'hydrogène à la cathode; mais on sait que le platine, comme la plupart des métaux, est susceptible d'absorber

les gaz surtout l'hydrogène; on peut constater, en effet, que, si les lames de platine ont une surface un peu grande, il ne se dégage d'abord presque rien(*). Après quelques instants, l'anode (*fig.* 236) est saturée d'oxygène, et la cathode d'hydrogène. Coupons alors le circuit, et mettons les deux électrodes en communication avec un électromètre : nous trouverons qu'il existe maintenant entre elles une différence de potentiel égale à 1,49 volt(**), l'anode étant au potentiel le plus élevé. Cela n'a rien de surprenant, car, en raison des propriétés des électrodes, il y a eu modification des contacts; actuellement, on a la série suivante :

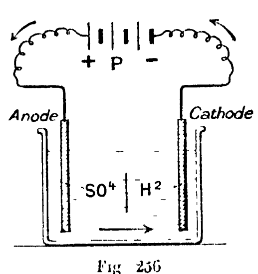


Fig 236

Platine (anode +)	Platine oxygéné	Eau acidulée	Platine hydrogéné	Platine (cathode −)

et il n'y a aucune raison pour que la différence de potentiel entre les deux extrémités de la chaîne soit nulle, l'appareil n'étant plus symétrique, comme au début. — Nous avons donc ainsi transformé le voltametre en une véritable pile; nous lui avons constitué des *pôles* : c'est ce qu'exprime le mot de *polarisation*. Les deux électrodes sont *polarisées*, comme l'était l'électrode de cuivre dans la pile de Volta.

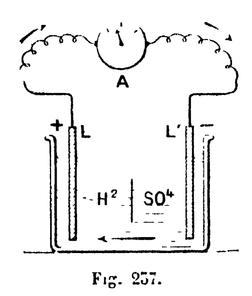


Fig. 237.

Si l'on ferme, sur un ampèremètre, le circuit de ce voltamètre polarisé, on constate naturellement l'existence d'un courant qui va, dans le circuit extérieur, de l'anode L à la cathode L′ (*fig.* 237), c'est-à-dire un courant de sens contraire à celui qui a polarisé le voltamètre. Pendant le passage de ce courant, l'acide est de nouveau électrolysé; l'ion H^2 se porte sur L où il est brûlé par l'oxygène qui imprègne le platine; l'ion SO^4 se porte sur L′, en réagissant sur l'eau (240) régénère l'acide sulfurique SO^4H^2, et donne de l'oxygène O qui brûle l'hydrogène contenu dans L′. Ces actions durent jusqu'à ce que les lames de platine soient *dépolarisées*, c'est-à-dire reve-

(*) L'expérience est encore plus frappante avec du palladium.

(**) De ce que nous avons vu précédemment (215) il résulte que la force électromotrice du générateur employé doit être supérieure à 1,49 volt; un seul élément Daniell serait donc insuffisant (1,09 volt); mais deux éléments suffiront. — Un élément Bunsen (1,8 volt) serait également suffisant.

nues à leur état normal. Alors l'appareil, redevenu symétrique, ne présente plus de différence de potentiel entre ses pôles.

On donne le nom de *pile secondaire* à un voltamètre ainsi polarisé ; le courant qu'il fournit est un *courant secondaire* (*).

262. ***Généralité des phénomènes de polarisation.*** – Ces phénomènes de polarisation, qui se manifestent, dans le voltamètre et dans la pile de Volta, par la création d'une *force électromotrice inverse*, se produisent toutes les fois qu'un courant traverse la surface de contact d'un métal et d'un électrolyte. Toutefois, *si l'électrolyte contient un sel du métal de l'électrode, la polarisation n'a pas lieu.* Par suite, un voltamètre quelconque pourra se polariser et devenir une pile secondaire, sauf lorsque les électrodes seront constituées par le métal même de l'électrolyte (cas du sulfate de cuivre avec électrodes en cuivre, ou de l'azotate d'argent entre deux lames d'argent, etc.).

Ces voltamètres polarisables sont donc *des récepteurs à force électromotrice inverse* (213), la force électromotrice de polarisation.

263. ***Accumulateurs.*** — Considérons un voltamètre polarisé, de force électromotrice E, et fermé sur un circuit extérieur; il fournira un courant secondaire qui transportera en tout autant de fois 96600 coulombs que le poids de métal de l'électrode, qui aura réagi pendant la période de polarisation, contiendra l'équivalent électrochimique de ce métal. Si donc on veut utiliser cette pile secondaire, il sera avantageux de constituer les électrodes avec un métal qui soit altéré le plus profondément possible; on augmentera ainsi la capacité (258) de la pile secondaire, et par suite la quantité d'énergie chimique qui s'y accumulera. Envisagée à ce point de vue, une pile secondaire prend le nom d'*accumulateur.*

264. ***Accumulateurs au plomb.*** — En essayant successivement les différents métaux, G. Planté (**) a reconnu que le plus avantageux est le plomb : il s'altère beaucoup plus profondément que les autres métaux pendant la polarisation, et la force électromotrice de la pile secondaire obtenue est supérieure à deux volts. Aussi, actuellement, presque tous les accumulateurs sont-ils constitués par des lames de plomb, immergées dans de l'eau acidulée par l'acide sulfurique.

Le poids de plomb mis en jeu, pendant que l'appareil fonctionnera

(*) Il n'est d'ailleurs pas indispensable, pour former la pile secondaire, que les lames de platine aient été saturées d'oxygène et d'hydrogène par électrolyse de l'eau acidulée ; il suffit de plonger pendant quelque temps les deux lames dans des éprouvettes contenant les gaz en question, et de les immerger ensuite dans l'eau acidulée; on constitue ainsi une véritable pile, dont le pôle positif est la lame oxygénée.

(**) G. Planté (1834-1900), électricien français, connu surtout à cause de sa découverte de l'accumulateur à lames de plomb (1859).

comme voltamètre, sera évidemment proportionnel à la surface des électrodes(*), d'où le dispositif suivant, qui permet d'avoir une pile secondaire de grande capacité. Les lames de plomb, généralement planes, sont placées dans un bac en verre (*fig.* 238), qui contient de l'eau acidulée (eau distillée contenant de 15 à 30 pour 100 d'acide sulfurique exempt d'arsenic). Les plaques de rang impair communiquent entre elles et constituent la cathode A; les plaques d'ordre pair, également reliées entre elles, forment l'anode B.

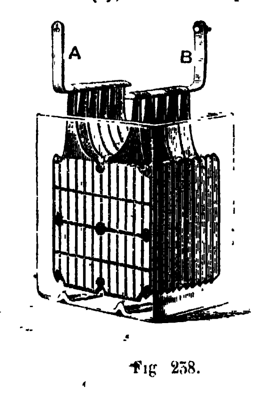


Fig 238.

Si l'on fait passer un courant dans l'appareil(**), l'acide sulfurique est électrolysé, l'hydrogène apparaît à la plaque négative (cathode) et réduit l'oxyde de plomb qui recouvre toujours le métal(***); la porosité du plomb ainsi réduit le rend plus apte que du plomb ordinaire à subir plus tard des réactions d'oxydation; sur la plaque positive (anode), apparaît SO^4, qui en réagissant sur l'eau régénère l'acide sulfurique et donne un atome d'oxygène O qui oxyde le plomb de l'anode, et *l'expérience montre* qu'il se forme du bioxyde de plomb, PbO^2. Quand la couche de bioxyde a atteint une certaine épaisseur, très faible d'ailleurs, l'oxydation du plomb cesse, et les gaz de l'électrolyse se dégagent purement et simplement. — Quand on décharge l'accumulateur, l'anode devient le pôle positif de la pile secondaire, et l'acide sulfurique est de nouveau électrolysé; l'hydrogène se porte sur la plaque positive et réduit le bioxyde de plomb à l'état de protoxyde PbO, qui, en présence de l'acide sulfurique, se transforme plus ou moins complètement en sulfate de plomb, SO^4Pb. Le radical SO^4 se porte sur la plaque négative; avec le plomb poreux, produit pendant la charge, il forme du sulfate de plomb. — Le courant de décharge durera tant que le bioxyde ne sera pas complètement réduit.

Si l'on fait de nouveau passer un courant de charge, du bioxyde

(*) Les lames ayant une grande surface, et l'épaisseur de l'eau acidulée qui les sépare étant faible, la résistance de cet accumulateur est pratiquement nulle (elle est inférieure à 0,01 ohm).

(**) La force électromotrice du générateur devra naturellement être supérieure à 2,6 volts, force électromotrice maximum de polarisation.

(***) Le plomb fraîchement nettoyé se recouvre très vite, à l'air, d'une couche d'oxyde Pb^2O.

se reforme sur la plaque positive (anode), par oxydation du sulfate, et il y a mise en liberté de l'acide sulfurique

$$O + SO^4Pb + H^2O = PbO^2 + SO^4H^2.$$

Quant au sulfate qui recouvre la plaque négative (cathode), il est réduit par l'hydrogène,

$$SO^4Pb + H^2 = SO^4H^2 + Pb;$$

la plaque se recouvre de nouveau de plomb poreux et l'acide sulfurique est régénéré (*).

L'expérience a montré que la production répétée de ces charges et de ces décharges successives a pour effet d'accroître progressivement l'épaisseur de la couche active à la surface des lames de plomb, et par suite d'augmenter la capacité de l'accumulateur : *l'accumulateur se forme par l'usage.*

265. ***Formation artificielle des accumulateurs.*** — Cette *formation naturelle* donne d'excellents résultats, mais elle a l'inconvénient d'être longue (2 mois) et par conséquent coûteuse, bien que le courant de décharge d'une batterie d'accumulateurs en formation puisse servir à en charger une autre dont la formation est moins avancée. Aussi a-t-on cherché, pour abréger la période de formation, à déposer artificiellement sur les plaques positives une couche de bioxyde de plomb, et du plomb poreux sur les plaques négatives. On a trouvé, de ce problème, une solution pratique, qui est adoptée généralement pour la construction des accumulateurs dits à *formation artificielle.* — On recouvre la plaque positive de minium (Pb^3O^4) et la plaque négative de protoxyde de plomb. La difficulté était de rendre adhérentes ces couches d'oxydes : on y a réussi à peu près en employant des plaques en forme de grilles, de dispositions variées à l'infini, dans les alvéoles desquelles on loge, par compression, des pastilles d'une pâte d'oxyde de plomb. — L'accumulateur ainsi monté n'est pas encore prêt à servir, mais une seule charge suffit pour transformer le minium de la plaque positive en bioxyde de plomb, et réduire à l'état de plomb métallique poreux le protoxyde de la plaque négative.

L'inconvénient des accumulateurs ainsi établis est le peu d'adhérence de la matière active pour le squelette de plomb de la plaque; les pastilles d'oxyde augmentent de volume pendant la charge, se

(*) On observe, en effet, que la densité du liquide, qui s'enrichit en acide, croît pendant la charge; on peut même juger que la charge est terminée lorsqu'un aréomètre plongé dans le liquide indique que la densité n'augmente plus. — On est encore averti de la fin de la charge, par ce fait que l'oxygène se dégage sur la plaque positive, en faisant bouillonner le liquide.

contractent pendant la décharge, et arrivent à se détacher (*); cet inconvénient se fait surtout sentir dans les accumulateurs qui actionnent des moteurs électriques de voitures (tramways, automobiles électriques), les trépidations favorisant la chute de la matière active. Aussi revient-on actuellement, surtout pour les batteries mobiles, aux accumulateurs à formation naturelle, la formation artificielle étant réservée aux batteries qui sont fixes et auxquelles on demande un service très régulier.

266. ***Régime de charge et de décharge des accumulateurs. — Capacité. — Rendement d'un accumulateur.*** — La charge et la décharge des accumulateurs nécessitent, pour le bon fonctionnement et la conservation, quelques précautions indispensables.

En principe, les courants trop intenses sont funestes aux accumulateurs; l'expérience a montré que, sauf pour des modèles spéciaux, l'intensité du courant de charge ou de décharge doit rester comprise, suivant les types, entre 0,5 et 3 ampères par kilogramme de plaques. — Pendant la charge, la force électromotrice de polarisation monte d'abord très rapidement jusqu'à 2,2 volts, et garde cette valeur pendant presque toute la durée de la charge; vers la fin, elle monte de nouveau très vite jusque vers 2,6 volts; mais cette force électromotrice ne se conserve pas; elle retombe spontanément à 2,1 volts après quelques instants. — A la décharge, la force électromotrice reste pendant longtemps constante, puis tombe brusquement de 2,1 volts à 1,8 volt; l'expérience a montré qu'il est préférable de ne pas vider complètement l'accumulateur et d'arrêter la décharge au moment où la force électromotrice commence à tomber.

Un accumulateur est caractérisé par sa *capacité* (258) *rapportée au kilogramme de plaques*; cette constante varie suivant les types d'accumulateurs, entre 10 et 20 ampères-heure, c'est-à-dire entre 36 000 et 72 000 coulombs.

Pendant la décharge, l'accumulateur ne rend pas complètement le nombre de coulombs qui lui a été fourni; la perte peut être de 10 pour 100.

Quant à l'énergie récupérée pendant la décharge, elle est forcément plus faible que l'énergie dépensée pendant la charge; en effet, pour charger l'accumulateur, il faut disposer d'un générateur de force électromotrice E supérieure à la force électromotrice E′ de polarisation; de plus, la quantité d'électricité Q′ restituée est plus

(*) Le plus grave inconvénient de ces chutes d'oxyde est que, les faces en regard des lames de plomb étant à moins d'un centimètre l'une de l'autre, les fragments d'oxyde restent suspendus entre les lames et établissent entre elles une communication permanente; l'accumulateur est, comme on dit, *mis en court circuit*, et se décharge sur lui-même sans que le courant passe dans le circuit extérieur. — Les batteries doivent, à cet égard, être activement surveillées.

petite que celle qui a été fournie Q; donc l'énergie fournie EQ sera supérieure à l'énergie récupérée E'Q'; le rapport $\frac{E'Q'}{EQ}$, inférieur à l'unité, s'appelle *le rendement en énergie de l'accumulateur*.

267. ***Usages des accumulateurs***. — Les accumulateurs rendent des services précieux dans un grand nombre d'installations. — On les emploie souvent comme *réservoirs d'énergie* : supposons qu'une usine, fonctionnant seulement de jour (de 7 h. du matin à 7 h. du soir), soit alimentée par une chute d'eau agissant sur une roue hydraulique quelconque. On pourra laisser marcher la roue motrice d'une façon continue, et utiliser le travail qu'elle fournit, pendant la nuit, pour actionner un générateur mécanique d'électricité; le courant ainsi produit sera employé à charger une batterie d'accumulateurs, qui restituera ensuite, à volonté, soit en travail mécanique, soit en lumière, l'énergie qu'elle aura absorbée.

Il peut encore arriver que, dans une installation électrique (éclairage, force motrice, etc.), la consommation d'énergie soit *irrégulière*. On peut alors adjoindre une batterie d'accumulateurs aux générateurs électriques de l'usine; au moment où l'énergie produite sera supérieure à l'énergie consommée, l'excès sera absorbé par la batterie d'accumulateurs. Au contraire, si, à un moment donné, le générateur ne fournit plus assez, la batterie fera l'appoint, en restituant l'énergie qu'elle avait emmagasinée. Elle jouera le rôle d'un volant dans une machine à vapeur : c'est ce qu'on appelle habituellement une *batterie-tampon*.

268. ***Couplage des piles et des accumulateurs***. — Il est rare que l'on n'ait à employer qu'un seul élément de pile, ou un seul accumulateur; on a, en général, à accoupler un certain nombre d'éléments; examinons les différents modes de couplage que l'on peut adopter, en supposant que *le circuit extérieur ne contienne aucun récepteur ayant une force électro-motrice inverse*.

1° *Couplage en série* (*ou en tension*). — Le montage que nous avons déjà indiqué (251) s'appelle montage *en série*, ou *en tension*. Prenons n éléments identiques, soit e la force électromotrice en volts et r la résistance en ohms de chacun d'eux; réunissons ces éléments par les pôles des noms contraires (*fig*. 239), et fermons le circuit par un conducteur de résistance R. La force électromotrice de la pile tout entière étant $E = ne$, et la résistance totale du circuit étant $nr + R$, l'intensité du courant est, d'après la formule d'Ohm (233) :

$$I = \frac{ne}{nr + R}.$$

Ce mode d'association convient spécialement au cas où le conduc-

teur extérieur présente *une résistance très grande* par rapport à celle de la pile. — En effet, en considérant nr comme négligeable vis-à-vis de R, on a sensiblement

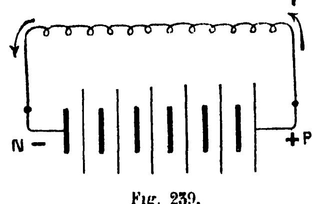


Fig. 239.

$$I = \frac{ne}{R},$$

c'est-à-dire que l'intensité est sensiblement proportionnelle au nombre des éléments. — Si, au contraire, R est très petit, on a sensiblement :

$$I = \frac{ne}{nr} = \frac{e}{r},$$

c'est-à-dire que l'intensité est la même que si l'on n'employait qu'un seul élément.

2° *Couplage en parallèle* (*ou en surface*). — On désigne, sous le nom de couplage *en parallèle*, le mode de montage dans lequel tous les pôles de même nom sont réunis entre eux (*fig.* 240), de sorte que le conducteur extérieur réunit l'ensemble P des pôles positifs à l'ensemble N des pôles négatifs. — Si l'on considère n éléments égaux, de résistance r, ainsi associés, le système se comporte comme *un seul élément* dont les électrodes auraient, avec la même distance, une surface n fois plus grande. Par suite, comme la résistance d'une colonne liquide est en raison inverse de sa section, la résistance de cet *élément multiple* est $\frac{r}{n}$, (234). Mais, comme la force électromotrice d'un élément de pile est indépendante de sa surface, et ne dépend que de la nature des corps qui le forment, la force électromotrice de cet élément multiple est toujours e. Si donc on désigne par J l'intensité du courant produit entre P et N, on aura, si R est la résistance du conducteur extérieur :

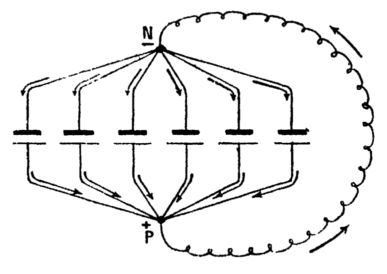


Fig. 240.

$$J = \frac{e}{\frac{r}{n} + R}.$$

Ce mode de couplage, qui est celui où la pile offre le moins de résistance, convient spécialement au cas où le conducteur extérieur présente *une résistance très petite* par rapport à celle de chacun des éléments de la pile. — En effet, en considérant R comme négligeable vis-à-vis de $\frac{r}{n}$, on a sensiblement $J = \frac{ne}{r}$, ce qui montre que, dans ce cas, l'intensité J est sensiblement *proportionnelle au nombre des éléments* (*). — Si, au contraire, on suppose R très grand, on a sensiblement $J = \frac{e}{R}$, c'est-à-dire que l'intensité est la même qu'avec un seul élément.

3° *Couplage mixte.* — Entre les deux cas extrêmes que nous avons considérés, se présentent des cas intermédiaires, où la résistance du conducteur extérieur est comparable à celle d'un ou plusieurs éléments. On groupe alors les éléments en un certain nombre de séries identiques, et l'on réunit en parallèle ces séries successives. — Si l'on a, par exemple, huit éléments, on pourra les réunir, ou en deux séries formées chacune de quatre éléments (*fig.* 241), ou en quatre séries formées chacune de deux éléments (*fig.* 242). Dans le premier cas, la force électromotrice est $4e$, e représentant toujours la force électromotrice d'un élément; d'autre part la résistance de la pile est $\frac{4r}{2}$, r étant la résistance de l'élément (234); par suite l'intensité sera :

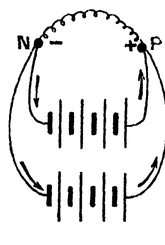


Fig. 241.

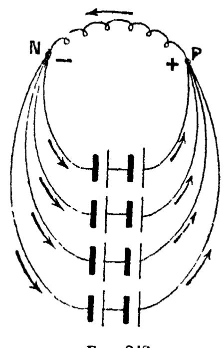


Fig. 242.

$$I_1 = \frac{4e}{\frac{4r}{2} + R},$$

R désignant toujours la résistance du circuit extérieur. — Dans le second cas on aurait de même :

$$I_2 = \frac{2e}{\frac{2r}{4} + R}$$

(*) L'association *en surface* convient, par exemple, au cas où l'on veut, avec des piles hydro-électriques, amener à l'incandescence des fils métalliques, toujours beau-

Le groupement le plus avantageux dépendra de la relation qui existera entre r et R, dans le cas actuel,

$$I_2 \gtrless I_1, \text{ suivant que } r \lessgtr R.$$

D'une manière générale, si S est le nombre total d'éléments, qu'on en forme n séries de m éléments, et qu'on couple les n séries en parallèle, chaque série a alors une force électromotrice me et une résistance mr : dès lors, la batterie formée par n de ces séries a la même force électromotrice me que chacune des séries, mais sa résistance est n fois plus petite, $\frac{mr}{n}$; si R est la résistance extérieure, l'intensité du courant entre P et N est alors

$$i = \frac{me}{\frac{mr}{n} + R} = \frac{e}{\frac{r}{n} + \frac{R}{m}}.$$

Pour que l'intensité i ait une valeur maximum, il faut que le dénominateur soit minimum. Or, remarquons que le produit de ses deux termes est constant, puisqu'il est égal à $\frac{rR}{S}$; dès lors, la somme des deux termes sera minimum quand ils seront égaux entre eux. Donc l'intensité sera maximum quand on aura

$$\frac{r}{n} = \frac{R}{m}, \quad \text{ou} \quad \frac{m}{n} = \frac{R}{r}.$$

— Les nombres m et n étant nécessairement des nombres entiers, on adoptera la disposition pour laquelle leur rapport sera le plus voisin de cette valeur.

On voit que, si cette relation est satisfaite, on a $\frac{mr}{n} = R$, c'est-à-dire que la *résistance de la pile est alors égale à la résistance du conducteur extérieur.*

Exemple. — Supposons que l'on dispose de 8 éléments, ayant 2 volts de force électromotrice et 0,2 ohm de résistance; si la résistance extérieure est 0,5 ohm, on trouve que les intensités correspondant aux quatre modes de couplage, envisagés plus haut, sont respectivement :

$$I = \frac{8 \times 2}{8 \times 0,2 + 0,5} = 7,62 \text{ ampères},$$

coup moins résistants que la pile elle-même. — C'est pour la même raison qu'il y a avantage, dans les expériences de ce genre, à employer des éléments à *grande surface* et en particulier des accumulateurs.

$$J = \frac{2}{\frac{0,2}{8} + 0,5} = 3,80 \text{ ampères},$$

$$I_1 = \frac{4 \times 2}{\frac{4 \times 0.2}{2} + 0,5} = 8,88 \text{ ampères}$$

$$I_2 = \frac{2 \times 2}{\frac{2 \times 0.2}{4} + 0,5} = 6,66 \text{ ampères.}$$

On voit que ce serait, dans ce cas, le montage en deux séries parallèles, chacune de quatre éléments, qui serait le plus avantageux au point de vue de l'intensité.

Remarque. — Il pourrait arriver, pour des raisons d'ordre pratique, que le mode de couplage, donnant le maximum d'intensité dans le circuit extérieur, ne fût pas applicable; cette solution pourrait conduire, par exemple, à faire traverser les générateurs par des courants qui les détérioreraient rapidement, à cause de leur trop grande intensité; c'est précisément le cas des accumulateurs; on devra alors, dans le calcul de l'installation, tenir compte des conditions imposées par la nature des générateurs.

269. ***Valeur économique des piles.*** — Si l'on calcule le prix de revient du kilowatt-heure (3 600 000 joules) fourni par une batterie de piles, on trouve qu'il est très élevé : environ 3 francs (*) pour des éléments Daniell; c'est plus de trois fois le prix de vente du kilowatt-heure fourni par les secteurs électriques parisiens. La raison en est que le zinc consommé dans les piles est un combustible cher (600 francs la tonne), et, bien que la pile soit un générateur à bon rendement, l'énergie ainsi produite revient à un prix inabordable. Il faudrait pouvoir, comme on le fait avec le zinc des piles, transformer directement en énergie électrique l'énergie chimique mise en jeu dans la combinaison avec l'oxygène d'un combustible à bon marché, tel que le charbon, et cela sans passer par l'intermédiaire de la chaleur Cette énergie est très grande; on sait, en effet, que la combustion d'un gramme de charbon dégage 8000 calories, sensiblement équivalentes à 0,009 kilowatt-heure; la dissolution d'un gramme de zinc dans un élément Daniell ne dégage que 800 calories, c'est-à-dire 10 fois moins que l'oxydation d'un gramme de charbon, et le zinc coûte à poids égal 20 fois plus cher que le charbon (**). L'énergie

(*) Le calcul ne présente aucune difficulté, si l'on connaît le prix des matériaux consommés dans la pile, zinc et électrolyte : il suffit de chercher, au moyen de la loi de Faraday, les poids de ces matériaux mis en jeu pendant que la pile fournit un kilowatt-heure.

(**) En évaluant le charbon à 30 francs la tonne, ce qui est exagéré dans bien des cas.

électrique provenant de l'énergie chimique dégagée par la combustion du charbon pourrait donc revenir à un prix deux cents fois moins élevé que celui auquel la fournit une pile Daniell, c'est-à-dire à environ 1,5 centime le kilowatt-heure. La machine à vapeur, qui, dans les cas les plus favorables, fait revenir le kilowatt-heure à 2,7 centimes, ne pourrait plus elle-même soutenir la lutte.

La pile doit donc être considérée comme un générateur de luxe; aussi, son emploi est-il limité aux cas où l'on n'a besoin que de faibles quantités d'énergie, et où la question de prix de revient est insignifiante, par exemple, dans la transmission électrique des signaux : sonneries, appareils télégraphiques et téléphoniques, etc. En fait, l'utilisation pratique des piles est limitée à ces cas particuliers.

CHAPITRE III

MAGNÉTISME

I. — Phénomènes généraux du magnétisme.

270. ***Aimants naturels et aimants artificiels.*** — Certains échantillons de l'oxyde de fer naturel, Fe^3O^4, jouissent de la propriété d'attirer le fer; on les appelle *aimants naturels*, ou *pierres d'aimant*. — Les anciens avaient observé cette propriété sur des aimants naturels que l'on trouvait assez abondamment au voisinage de deux villes portant toutes deux le nom de *Magnésie*, l'une située en Macédoine, l'autre en Asie Mineure : de là le nom de *magnétisme*, que l'on a donné à la cause, de nature inconnue, à laquelle est due cette propriété.

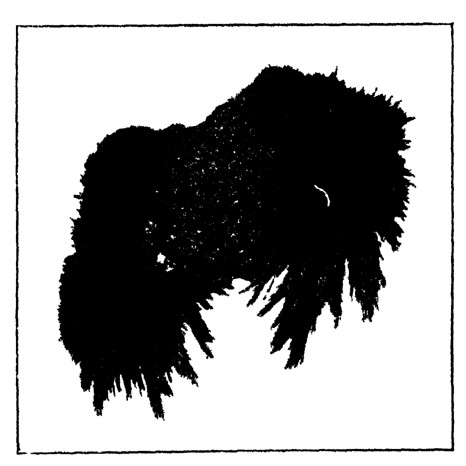


Fig. 243.

Tous les points d'une pierre d'aimant n'attirent pas également la limaille; celle-ci s'attache de préférence autour de certains points, sous forme de houppes (*fig.* 243).

La propriété magnétique ne subit pas de déperdition comme la propriété électrique : les aimants naturels, sans rien perdre de leur puissance, peuvent communiquer, par frottement, la propriété magnétique à l'acier trempé. Les barreaux d'acier, ainsi aimantés artificiellement, prennent le nom d'*aimants artificiels*. — On leur donne habituellement la forme de *barreaux* cylindriques ou parallélépipédiques (*fig.* 245), ou encore la forme d'*aiguilles*, constituées par des lames d'acier plates, taillées en losanges très allongés (*fig.* 246). Lorsqu'on veut utiliser un aimant pour

attirer une pièce de fer, on donne généralement à cet aimant la forme d'un barreau recourbé en fer à cheval (*fig.* 317).

271. *Pôles d'un aimant.* — Quand on plonge un barreau aimanté dans la limaille de fer, on voit les grains de limaille s'attacher surtout aux extrémités, sur une certaine étendue, où ils forment des

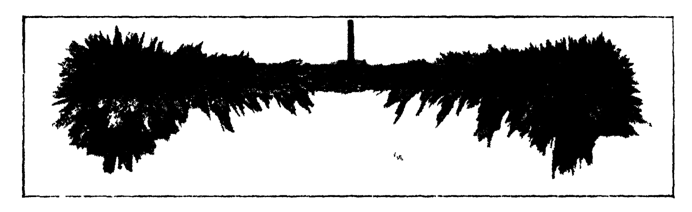


Fig. 244

houppes plus ou moins abondantes (*fig.* 244). La propriété magnétique paraît donc concentrée vers les extrémités des barreaux, tandis que leur partie moyenne, ou *ligne neutre*, en est dépourvue. Nous donnerons à ces extrémités, qui présentent ainsi des maxima d'action, le nom de *pôles* de l'aimant; ce terme sera d'ailleurs défini plus loin, avec précision (*).

272. *Action de la Terre sur un aimant. — Distinction des deux pôles.* — Un barreau aimanté étant suspendu horizontalement par un fil (*fig.* 245), et abandonné à lui-même, on le voit, après quelques oscillations, prendre une direction fixe, qui est à peu près celle du nord au sud, et à laquelle il revient toujours quand on l'en écarte. — Si l'on vient à retourner le barreau, de manière à placer du côté du nord le pôle qui s'était dirigé vers le sud, et qu'on l'abandonne de nouveau, on le voit faire une demi-révolution et revenir, après quelques oscillations, à sa position primitive. Cette expérience montre que les deux pôles ne sont pas identiques : nous appellerons désormais *pôle nord* celui qui se dirige vers le nord, et *pôle sud* celui qui se dirige vers le sud. — Nous appelle-

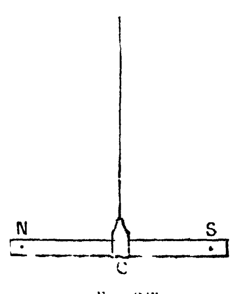


Fig. 245

(*) Il arrive parfois que des barreaux, aimantés d'une façon spéciale, ou les aimants naturels, au lieu d'offrir seulement deux pôles et une ligne neutre, présentent, dans leur longueur, plusieurs centres d'attraction, qu'on appelle *points conséquents*; ces points sont séparés par des régions inactives. C'est là une irrégularité dont nous ne nous occuperons pas.

rons de même *magnétisme nord* le magnétisme contenu dans la moitié nord de l'aimant, et *magnétisme sud* le magnétisme contenu dans la moitié sud.

273. ***Actions réciproques des pôles de deux aimants.*** — *Deux pôles de même nom se repoussent; deux pôles de noms différents s'attirent.* — Soit une aiguille aimantée, dont on aura déterminé le pôle nord N (*) et le pôle sud S (*fig.* 246), et un barreau dont on aura également déterminé le pôle nord N′ et le pôle sud S′. Lorsqu'on présente au pôle nord N le pôle nord N′, on observe une répulsion. De même, le pôle sud S′ repousse le pôle sud S. — Au contraire, le pôle nord N′ attire le pôle sud S.

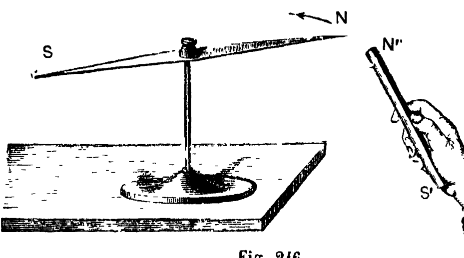


Fig 246.

274. ***Expérience de l'aimant brisé.*** — Prenons une aiguille d'acier aimantée NS (*fig.* 247), et plongeons-la dans la limaille de

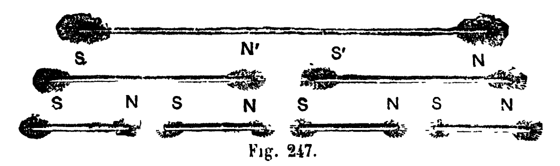


Fig. 247.

fer, de manière à constater que la limaille s'attache seulement à ses deux extrémités, et que son milieu est neutre; approchons-la ensuite d'une autre aiguille aimantée, afin de distinguer le pôle nord N du pôle sud S. Cela fait, brisons l'aiguille au milieu; chacun des deux fragments attire la limaille de fer par ses deux extrémités, et l'on peut constater que le fragment de gauche a un pôle nord en N′, un pôle sud en S, et une ligne neutre en son milieu; le fragment de droite a, de même, un pôle nord en N, un pôle sud en S′, et une ligne neutre en son milieu. — Brisons l'un de ces fragments en deux parties : chacun des fragments partiels

(*) La moitié nord de l'aiguille se distingue ordinairement par une teinte bleu foncé. Cette teinte est due à une mince couche d'oxyde, formée pendant l'élévation de température qui produit le *recuit* de l'acier trempé ; après que l'aiguille a été aimantée, le constructeur enlève cette couche d'oxyde sur la moitié sud.

devient encore un aimant complet, dont les pôles sont distribués comme l'indique la figure, et il en est toujours de même, quelque loin qu'on pousse la division des fragments. — On ne peut donc jamais arriver à obtenir, dans un fragment, si petit qu'il soit, du magnétisme d'une seule espèce, ce qui constitue une distinction profonde entre les aimants et les conducteurs électrisés.

En imaginant la segmentation poussée jusqu'à la dernière limite, on doit donc considérer chaque particule d'un aimant comme étant elle-même un aimant complet, possédant un pôle nord et un pôle sud.

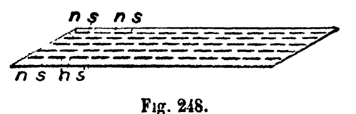


Fig. 248.

On peut d'ailleurs vérifier cette conclusion, en faisant l'expérience inverse de celle de l'aimant brisé. Si l'on colle sur des feuilles de papier fort, ou de clinquant, un grand nombre de bouts de fil d'acier aimantés (*fig.* 248), en orientant leurs pôles nord tous du même côté, et qu'on empile plusieurs feuilles ainsi préparées, l'ensemble se comporte exactement comme un barreau aimanté.

275. ***Notion de quantité de magnétisme.*** — Plaçons une longue aiguille aimantée NS (une aiguille à tricoter) sur le plateau d'une balance sensible (*fig.* 249); après en avoir fait la tare dans l'autre plateau, approchons de cette aiguille une seconde aiguille N_1S_1, parallèle à NS et placée comme l'indique la figure, de telle sorte que les pôles N et N_1 soient sur une même verticale, et que leur distance *d* ne dépasse pas quelques centimètres.

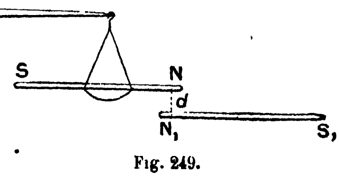


Fig. 249.

Ces deux pôles, de même espèce, vont se repousser : pour ramener le fléau à être horizontal, c'est-à-dire pour ramener le pôle N à la même distance *d* de N_1, il faudra, si N_1 est maintenu fixe, ajouter un poids P_1 dans le plateau qui porte NS; ce poids mesurera en grammes la répulsion qui s'exerce entre les deux pôles en regard (*) : si l'on voulait exprimer cette force en *dynes* (151), il faudrait multiplier sa valeur en grammes par 981, puisque le poids du gramme vaut 981 dynes. — Répétons identiquement la même expérience en substituant à N_1S_1 une autre aiguille N_2S_2; pour rétablir l'horizontalité du fléau, la distance *d* restant la même, il faudra ajouter un poids P_2. Cela posé, suivant que P_1 sera *supérieur*, *égal*, *ou inférieur* à P_2, nous dirons, et *c'est une définition*, que *le pôle* N_1

(*) En réalité, le pôle N agit aussi sur S et l'aiguille NS est encore soumise à l'action du pôle S_1 ; mais ces actions sont très faibles, si les aiguilles sont assez longues par rapport à la distance.

contient une quantité de magnétisme nord supérieure, égale ou inférieure à celle qui est contenue dans le pôle nord N_2; et, d'une manière générale, *si* P_1 *est double, triple, etc., de* P_2, nous dirons que *le pôle* N_1 *contient une quantite de magnétisme nord double, triple, etc., de celle qui est contenue dans* N_2.

276. *Unité de pôle.* — On est convenu de prendre comme *unite de pôle nord, dans le système*(*) C. G. S. *d'unités, le pôle nord qui exerce sur un pôle égal, placé à* 1 *cm, une force répulsive égale à* 1 *dyne.* — On définirait d'une manière analogue l'unité de pôle sud.

277. *Loi de Coulomb.* — Coulomb a déduit d'un grand nombre d'expériences que deux pôles d'aimant exercent l'un sur l'autre une force qui est *inversement proportionnelle au carré de leur distance*; par suite, à cause de la définition de la quantité de magnétisme contenu dans un pôle, on pourra représenter cette force par une formule analogue à celle des actions électrostatiques :

$$f = K\frac{mm'}{r^2}.$$

Dans cette formule, m et m' étant les valeurs des pôles en unités C. G. S., et r leur distance en centimètres, f est exprimée en dynes. D'ailleurs, comme, d'après la définition de l'unité de pôle (276), on doit avoir $f = 1$ dyne pour $m = m' = 1$ et $r = 1$ cm, il s'ensuit que, dans les conditions de l'expérience de définition (275), c'est-à-dire dans l'air, $K = 1$. — Pour les autres milieux, K a très sensiblement la même valeur que dans l'air, sauf cependant pour ceux qui contiennent du fer, du nickel ou du cobalt.

II. — Notion de champ magnétique. Champ magnétique terrestre.

278. — ***Spectres magnétiques.*** — ***Champ magnétique d'un aimant.*** — ***Lignes de force du champ.*** — La propriété que possède un aimant d'agir sur la limaille de fer peut être mise en évidence par une expérience qui va nous conduire à une notion importante.

Sur un barreau aimanté, plaçons une feuille de carton ou une lame de verre horizontale; puis, au moyen d'un tamis fin, faisons tomber sur ce carton une pluie de limaille de fer : on voit les grains se grouper de manière à dessiner le contour du barreau (*fig.* 250),

(*) Le système d'unités C. G. S. que l'on étudiera plus tard (Classes de Mathématiques A et B) est le seul employé dans la mesure des grandeurs magnétiques proprement dites.

surtout si l'on a soin d'imprimer au carton de petites secousses, pour permettre à la limaille de se déplacer à sa surface. Elle forme de longs filaments, qui vont converger vers les pôles; au-dessus de la région neutre, se trouve un peu de limaille, qui est demeurée là où elle était tombée; enfin, autour de cette région, les filaments se courbent en arcades, et viennent réunir les points symétriques des deux moitiés du barreau. — Une pareille figure est ce qu'on nomme un *spectre magnétique*.

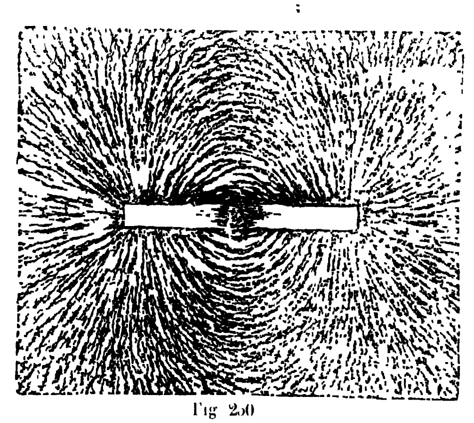


Fig. 250

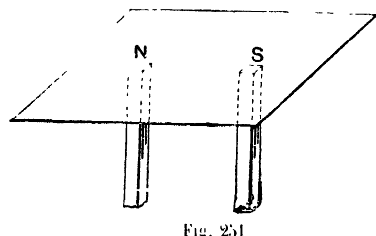


Fig. 251

Cette expérience montre d'abord que l'action magnétique de l'aimant se fait sentir à travers les corps solides, tels que le carton; on peut substituer à la feuille de carton, une lame de verre, une planchette de bois, ou même une feuille métallique (pourvu que ce ne soit pas du fer), l'expérience réussit de la même manière.

L'action de l'aimant se fait sentir à distance; il existe donc, autour de l'aimant, un espace dans lequel s'exercent les *forces magnétiques* émanées des pôles de l'aimant. On a

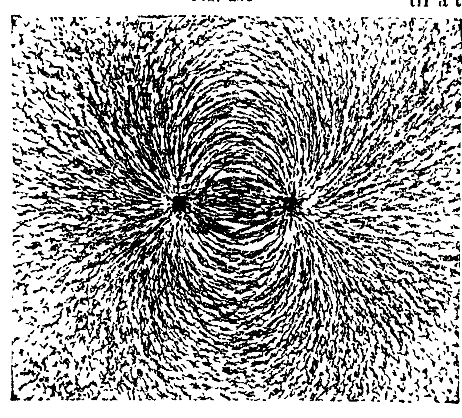


Fig. 252.

donné le nom de *champ magnétique* à l'espace ainsi soumis à l'action magnétique de l'aimant; et nous appellerons *lignes de force* ces lignes dessinées par la limaille.

En plaçant verticalement, en sens inverse (*fig.* 251) deux barreaux aimantés, et projetant de la limaille de fer sur une feuille de carton horizontale appuyée sur les deux extrémités N et S, on obtient le spectre magnétique de la figure 252. — Si les deux pôles mis en regard sont deux pôles de meme nom, le spectre magnétique présente l'aspect de la figure 253.

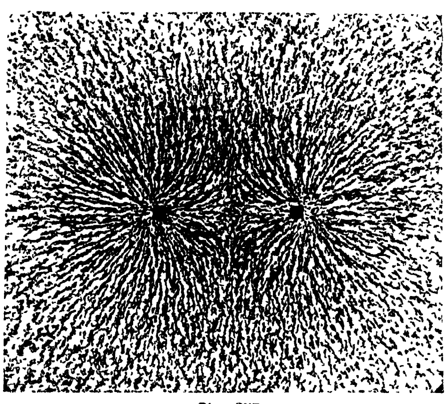


Fig. 253.

L'examen, même superficiel, de ces figures montre clairement que les lignes de force, émanées des points d'une région nord, vont à la rencontre de celles qui ont pour origine une région sud, et se confondent avec elles lorsqu'elles les rencontrent; au contraire, les lignes de force, émanées de deux régions nord, semblent se repousser mutuellement (*fig.* 253).

279. ***Autre mode d'exploration du champ magnétique d'un aimant.*** — La direction des lignes de force d'un champ magnétique peut encore être mise en évidence par l'expérience suivante. Une

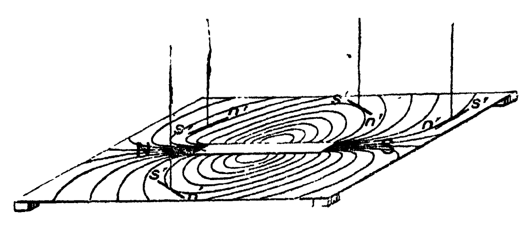


Fig. 254.

très petite aiguille à coudre aimantée est suspendue horizontalement à un fil très fin (fil de cocon); on la transporte en un point quelconque, très près de la feuille de carton sur laquelle on a produit le

spectre magnétique d'un aimant; elle prend aussitôt une direction tangente à la ligne de force qui passe au point de suspension (*fig.* 254); de plus, elle s'oriente le long de la ligne de force à laquelle elle est tangente, de telle sorte que son pôle sud s' soit tourné du côté de la région nord, et son pôle nord n' du côté de la région sud de l'aimant. — Cette expérience est d'autant plus nette que l'aiguille est plus fine et plus courte.

280. ***Direction et intensité d'un champ magnétique.*** — Prenons une petite aiguille aimantée dont le pôle nord ait précisément pour valeur l'*unité de pôle* (276); suspendons-la par son centre de gravité, et plaçons-la dans le champ magnétique d'un aimant (*fig.* 255). Le pôle nord n, placé en un point A, sera soumis, de la part de la région nord de l'aimant, à des forces répulsives admettant une résultante F; ce pôle n sera également soumis de la part de la région sud S à des forces attractives dont la résultante sera F'; ces deux forces admettront une résultante $\mathcal{H}$; par définition, *la direction du champ magnétique au point* A *sera la direction de cette résultante*, et l'intensité $\mathcal{H}$ de cette résultante, sera *l'intensité du champ magnétique au point* A. — Il est facile de voir que la *direction du champ en un point est tangente à la ligne de force qui passe en ce point*; en effet, le pôle s, supposé très près de n (l'aiguille est très petite), sera soumis, de la part de l'aimant NS, à une force $\mathcal{H}'$ qui sera de sens contraire à celle qui agit sur n. L'aiguille ns, mobile autour de son centre de gravité, prendra une direction telle que les deux forces $\mathcal{H}$ et $\mathcal{H}'$ soient dans le prolongement l'une de l'autre; nous savons (279) que la direction de l'aiguille est alors tangente à la ligne de force sur laquelle elle se trouve.

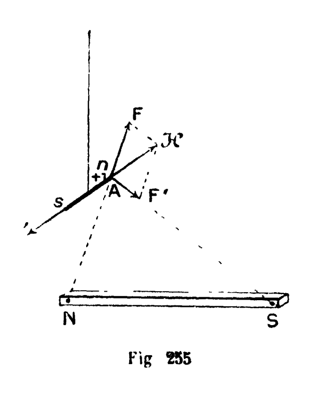


Fig 255

281. ***Sens des lignes de force.*** — Sur chaque ligne de force, on peut envisager deux sens; pour faciliter le langage, nous appellerons *sens d'une ligne de force*, celui dans lequel *un pôle nord, placé sur cette ligne, serait sollicité de la part du champ*; c'est le *sens du champ* en ce point.

Nous considérerons, par suite, les lignes de force comme émises par les points des aimants où il y a du magnétisme nord, et se dirigeant vers les points où il se trouve du magnétisme sud.

282. ***Unité d'intensité : gauss.*** — On est convenu de prendre comme unité C.G.S. d'intensité de champ magnétique, l'*intensité*

d'un champ qui exerce sur l'unité de pôle nord une force égale à une dyne; on a donné le nom de **gauss** (*) à cette unité. — Les champs magnétiques les plus intenses que nous sachions produire ne dépassent guère 40 000 gauss.

283. ***Champ magnétique uniforme.*** — En général, les lignes de force affectent la forme de courbes, et l'intensité du champ varie d'un point à l'autre. — Dans certains cas particuliers, *les lignes de force sont des droites parallèles : l'intensité est alors constante en tous les points*; un pareil champ est dit *uniforme*. — Nous indiquerons plus loin (294) un moyen de réaliser un tel champ dans une portion donnée de l'espace.

284. ***Flux de force magnétique.*** — Considérons une aire plane S, de contour quelconque, placée dans un champ magnétique uniforme d'intensité $\mathcal{H}$, et perpendiculaire aux lignes de force de ce champ (*fig.* 256); nous appellerons *flux de force magnétique* à travers cette surface, le produit

Maxwell $$\Phi = S\mathcal{H} \text{ (**)}.$$

S

Fig. 256.

Si S est exprimée en centimètres carrés, et $\mathcal{H}$ en gauss, Φ est exprimé au moyen d'une unité qui a reçu le nom de maxwell (***).

Dans le cas où le plan de la surface S n'est pas perpendiculaire aux lignes de force, si θ est l'angle aigu que fait la normale à la surface S avec les lignes de force, le *flux de force magnétique* est défini par le produit

$$\Phi = S\mathcal{H}\cos\theta.$$

285. ***Champ magnétique terrestre.*** — Au voisinage de la Terre, un aimant mobile autour de son centre de gravité (*fig.* 257) (****), et

(*) En mémoire de Gauss (1777-1855), illustre mathématicien et physicien allemand, à qui l'on doit, outre des travaux mathématiques très remarquables, d'importantes recherches sur l'Électricité et le Magnétisme.

(**) On pourrait dire, bien que l'expression soit incorrecte, qu'une « certaine quantité de force magnétique passe à travers la surface S »; le flux de force magnétique serait précisément cette quantité de force. Envisagée à ce point de vue, la force magnétique aurait quelque analogie avec l'eau courante d'une rivière; si l'on plonge, dans le courant, un cerceau ayant le même contour que S, il s'écoulera, à travers le cerceau, une certaine quantité d'eau; on peut dire encore qu'un certain flux (latin *fluere*, couler) de liquide traverse le cerceau. C'est de cette analogie un peu vague que vient l'expression générale de flux de force et en particulier l'expression « flux de *force magnétique* ».

(***) En mémoire de Maxwell, illustre mathématicien et physicien anglais (1831-1879).

(****) Pour suspendre un aimant *ns* (*fig.* 257) par son centre de gravité, on le munit d'un axe horizontal OO' perpendiculaire à sa direction et passant par son centre de gravité; on supporte cet axe au moyen d'un étrier E, suspendu lui-même à un fil *f* sans torsion.

éloigné de tout autre aimant, s'oriente dans une direction déterminée : il existe donc autour de la Terre un champ magnétique. — Si l'on répète cette expérience en divers points voisins les uns des autres (dans une même salle, par exemple), on constate que l'aiguille *ns* reste parallèle à une direction fixe : au voisinage d'un point donné, les lignes de force du champ magnétique terrestre sont donc des *droites parallèles*. A Paris, elles sont dirigées à peu près vers le nord, et inclinées d'un angle notable sur l'horizon.

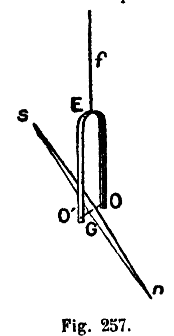


Fig. 257.

Le champ magnétique terrestre est donc uniforme au voisinage d'un même point (*).

286. *Méridien magnétique. — Déclinaison. — Inclinaison.* — On appelle *méridien magnétique en un point*, le *plan vertical* qui contient la ligne de force du champ terrestre passant par ce point.

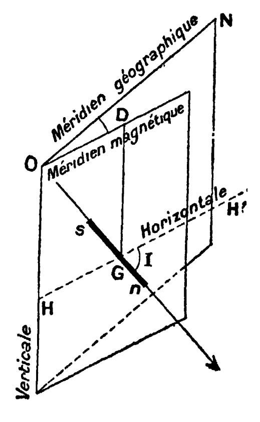


Fig. 258.

La direction du champ terrestre est définie, en un point donné, par les deux angles suivants : 1° *la déclinaison* D (*fig.* 258), angle du plan du méridien géographique avec le plan du méridien magnétique; 2° *l'inclinaison* I, angle que fait la direction de la ligne de force avec l'horizontale HH' située dans le plan du méridien magnétique.

287. *Eléments du champ magnétique terrestre à Paris.* — A Paris (Panthéon), au 1er janvier 1912, les valeurs de la déclinaison et de l'inclinaison étaient :

$$D = 13°50' \text{ ouest}$$
$$I = 64°32'.$$

L'intensité du champ terrestre avait alors pour valeur :

$$\mathcal{F} = 0,4612 \text{ gauss.}$$

Sa projection horizontale, égale à $\mathcal{F} \cos I$, était sensiblement

$$\mathcal{H} = 0,1982 \text{ gauss.}$$

Ces valeurs varient d'ailleurs lentement avec le temps.

(*) La Terre semble se comporter comme si elle était aimantée faiblement, du magnétisme sud étant réparti dans l'hémisphère nord et du magnétisme nord dans l'hémisphère sud. — Nous étudierons un peu plus loin (388) la forme générale du champ magnétique terrestre.

288. ***L'action du champ terrestre sur un aimant se réduit à un couple.*** — La Terre tend à donner à un aimant une certaine orientation, mais elle n'a aucune tendance à lui communiquer un mouvement de translation. — Les expériences suivantes le montrent nettement. En premier lieu, la résultante des actions de la Terre sur un aimant *n'a pas de composante verticale*, car le poids d'un barreau d'acier n'est pas changé par l'aimantation ; en second lieu, la résultante des actions de la Terre sur un aimant *n'a pas de composante horizontale* ; en effet, si l'on pose un aimant sur un flotteur en liège placé à la surface d'une nappe d'eau tranquille, on constate que le système tourne sur lui-même pour s'orienter, mais ne prend aucun mouvement de translation. — L'action du champ magnétique terrestre n'ayant ni composante horizontale, ni composante verticale, et n'étant pas nulle, ne peut que se réduire à *un couple* (*) : *l'action magnétique de la Terre sur un aimant est donc purement directrice.*

Il résulte de ce fait que les deux pôles d'un aimant ont *la même intensité*, et contiennent des quantités de magnétisme mesurées par le même nombre.

289. ***Définition précise des pôles. — Axe magnétique d'un aimant.*** — Considérons un barreau aimanté, placé dans un champ uniforme (*fig.* 259), dont les lignes de force ont pour direction LL′ ; les quantités de magnétisme nord réparties dans l'aimant seront soumises, de la part du champ à un système de forces toutes parallèles et dirigées dans le même sens que le champ ; ces forces admettent une résultante F dirigée comme les composantes, égale à leur somme, et appliquée en N, centre de ces forces parallèles. L'action du champ sur les quantités de magnétisme sud de l'aimant se ramènera de même à une résultante F′ égale à F en grandeur, mais dirigée en sens inverse des lignes de force, et appliquée en un point S de la région sud du barreau. Ces points N et S sont d'une façon précise ce qu'on appelle les *pôles* de l'aimant, et la distance NS $= l$ est la *longueur magné-*

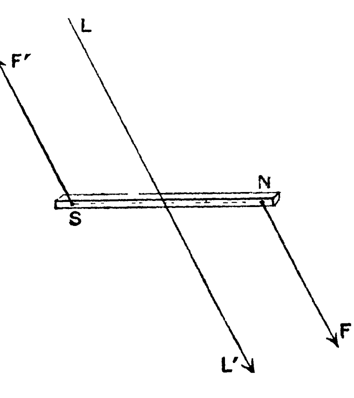


Fig. 259.

(*) Voir la première partie du Cours, Seconde C et D, 4e éd., page 16.

tique de l'aimant; la droite NS s'appelle l'*axe magnétique* de l'aimant.

290. *Moment magnétique d'un aimant. — Intensité d'aimantation.* — Plaçons un barreau aimanté NS (*fig.* 260) dans un champ magnétique uniforme, d'intensité $\mathcal{H}$, et orientons-le de telle sorte que son axe magnétique soit perpendiculaire à la direction des lignes de force : l'aimant sera soumis à un couple dont le moment a pour valeur Fl. Si l'intensité du champ devient $2\mathcal{H}$, $3\mathcal{H}$, etc., la force du couple deviendra double, triple... de sa valeur primitive, et le moment du couple deviendra aussi double, triple, etc. — On peut donc dire que, si un aimant est placé dans un champ uniforme, *le moment du couple qui agit sur lui est proportionnel à l'intensité du champ.*

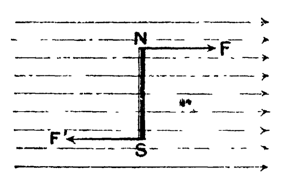


Fig. 260.

Cela posé, nous appellerons *moment magnétique* $\mathfrak{M}$ *d'un aimant, le moment du couple qui agit sur ce barreau, quand il est placé dans un champ magnétique d'intensité* 1 *et orienté perpendiculairement aux lignes de force du champ.* — Si le champ d'intensité $\mathcal{H}$, fait un angle θ avec la direction SN de l'axe magnétique d'un aimant (*fig.* 261), le moment du couple tendant à orienter l'aimant parallèlement aux lignes de force sera

$$C = \mathfrak{M}\mathcal{H} \sin\theta,$$

car le bras de levier du couple est maintenant $AB = l \sin\theta$, tandis que les forces du couple n'ont pas changé, les pôles et le champ ayant gardé la même valeur. — Chaque aimant, en particulier, pourra *être caractérisé par la valeur de son moment magnétique.*

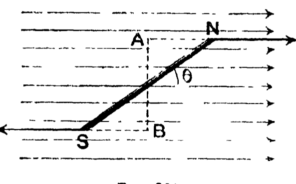


Fig. 261.

Nous appellerons *intensité moyenne d'aimantation* d'un barreau aimanté, le quotient $\mathfrak{J} = \frac{\mathfrak{M}}{V}$ de son moment magnétique par son volume V évalué en centimètres cubes. — Cette expression caractérise, en effet, le degré d'aimantation du barreau : à volume égal, plus le moment magnétique est grand, plus l'aimantation est intense.

L'intensité d'aimantation d'un barreau de bon acier trempé (contenant 1,5 0/0 de carbone), tel que ceux que l'on trouve dans les collections, peut aller assez facilement jusqu'à 400 unités. Supposons que les dimensions d'un pareil barreau soient 20 cm, 2 cm, 1 cm;

son volume sera égal à 40 cm³, et son moment magnétique sera de 16000 unités C. G. S. Si donc on place ce barreau perpendiculairement aux lignes de force du champ magnétique terrestre, il sera soumis à un couple dont le moment aura pour valeur (287)

$$C = 16000 \times 0{,}461 = 7376 \text{ unités C.G.S.}$$

Si l'on suppose que les forces du couple sont appliquées aux deux extrémités du barreau, c'est-à-dire si le bras de levier du couple est de 20 cm, chacune des forces vaudra en dynes (*)

$$F = \frac{7376}{20} = 368 \text{ dynes environ,}$$

ou à peu près le poids de 0,38 gramme.

Des mesures faites sur le magnétisme terrestre, Gauss a pu déduire l'intensité d'aimantation de la Terre; il l'a trouvée égale à 0,08, à peu près, c'est-à-dire 5000 fois plus petite que celle d'un bon aimant d'acier.

(*) Rappelons que, dans le système d'unités C. G. S (151), l'on a choisi pour *unités de longueur* le *centimètre* et pour *unité de force*, la *dyne*, qui est égale à la 981ᵉ partie du poids du gramme.

CHAPITRE IV

ÉLECTROMAGNÉTISME

I. — Champs magnétiques produits par les courants Action d'un courant sur un aimant.

291. ***Expérience d'Œrstedt.*** — ***Règle d'Ampère.*** — L'action du courant électrique sur un aimant fut observée pour la première fois par Œrstedt, en 1819 (*). — Si l'on place un fil XY dans une direction parallèle à une aiguille aimantée *ns*, mobile sur un pivot (*fig.* 262), on voit l'aiguille s'écarter de sa position d'équilibre, dès qu'on fait passer un courant dans le fil. Le sens de la déviation de l'aiguille dépend à la fois de la direction du courant dans le fil, et de la position du fil par rapport à l'aiguille. Il est, dans tous les cas, donné par une règle très simple, due à Ampère :

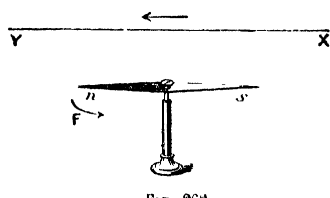


Fig. 262

On suppose qu'un observateur soit couché le long du fil, de manière que le courant entre par les pieds et sorte par la tête ; de plus, cet observateur regarde l'aimant ; sa droite et sa gauche sont ce qu'on appelle la droite et la gauche du courant. Cela posé, la règle d'Ampère peut s'énoncer ainsi : *L'action du courant sur l'aimant tend à porter le pôle nord à la gauche du courant.*

De cette expérience, il résulte immédiatement cette conséquence importante : *Un courant électrique, en se propageant dans un conducteur, crée autour de lui un champ magnétique de même nature que le champ magnétique d'un aimant.*

L'étude de ce champ, faite au moyen du spectre magnétique obtenu

(*) Œrstedt (1771-1851), physicien danois, professeur à Copenhague, est surtout connu par l'expérience célèbre rapportée ici; cette expérience fut le point de départ des travaux d'Ampère sur les actions magnétiques des courants.

avec de la limaille de fer (278), ou avec une petite aiguille aimantée suspendue par un fil (279), va nous conduire à des résultats importants. — Nous examinerons successivement divers cas particuliers intéressants.

292. ***Champ d'un courant rectiligne.*** — Si l'on tend verticalement un fil rectiligne xy (*fig.* 263) parcouru par un courant suffisamment intense (une dizaine d'ampères, au moins), et si l'on projette de la limaille de fer sur une feuille de carton horizontale traversée par ce fil, on voit se former un spectre magnétique : *les lignes de force sont des circonférences concentriques ayant leur centre sur l'axe du fil.* — Si un pôle nord est placé en un point d'une de ces lignes de force, il sera soumis de la part du champ à *une force tangente à cette ligne et dirigée de droite à gauche pour l'observateur d'Ampère* (291), *cette force est donc perpendiculaire au plan passant par le courant et le pôle considéré.* — Dans le cas de la figure, le courant est supposé ascendant; pour l'observateur d'Ampère, le sens des lignes de force est inverse du sens du mouvement des aiguilles d'une montre.

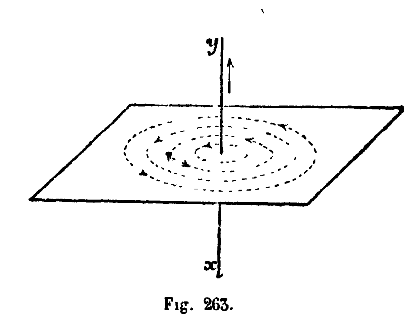


Fig. 263.

Si l'on juxtapose deux courants rectilignes d'égale intensité, mais de sens contraire, par exemple en repliant le fil sur lui-même, comme l'indique la figure 264, l'expérience montre que le *champ magnétique* est nul; on conclut de là que *le champ magnétique créé par un courant rectiligne change de sens avec le courant, mais conserve la même intensité*; dans le dispositif figuré ci-contre, en un point A, chacune des deux portions rectilignes du courant produit un certain champ; la résultante de ces deux champs est nulle, puisqu'ils sont égaux et opposés. — Cette conclusion n'est pas modifiée si l'un des courants présente des sinuosités très petites, au lieu d'être rectiligne (*fig.* 265)(*).

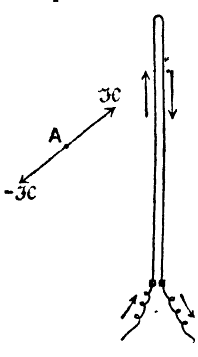


Fig. 264.

Fig. 265.


(*) Il ne faudrait pas cependant que le fil sinueux fût enroulé autour du premier.

On déduit de là que *le champ d'un courant sinueux est le même que celui d'un courant rectiligne terminé aux mêmes extrémités, à condition toutefois que l'amplitude des sinuosités soit très petite.*

293. ***Champ d'un courant circulaire.*** — Le fil conducteur du courant a la forme circulaire (*fig.* 266) et passe dans deux trous A et B percés dans une feuille de carton horizontale, perpendiculaire au plan du cercle et contenant le centre : en projetant de la limaille de fer sur le plan du carton, on la voit se disposer suivant des courbes qui enveloppent les deux points A et B (*). Pour l'observateur d'Ampère placé en un point quelconque du circuit, les lignes de force sont dirigées de sa droite vers sa gauche. — Par raison de symétrie, le spectre magnétique a la même forme dans tous les plans que l'on peut mener par l'axe XY du cercle.

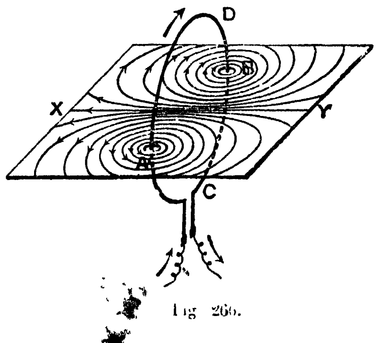


Fig. 266.

Le faisceau des lignes de force de ce champ magnétique traverse la surface du cercle en entrant par la *face de droite* du courant (droite de l'observateur d'Ampère regardant vers l'intérieur du cercle) dans le cas de la figure, et il en sort par l'autre face qui est alors la *face de gauche* du courant fermé. — D'une manière générale, *les lignes de force sortent de la face du courant devant laquelle il faut se placer pour voir le courant tourner en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre.* — On le vérifie sans peine, en plaçant au centre du cercle une aiguille aimantée mobile dans un plan horizontal; elle s'oriente suivant XY, son pôle nord dirigé vers X (*fig.* 267).

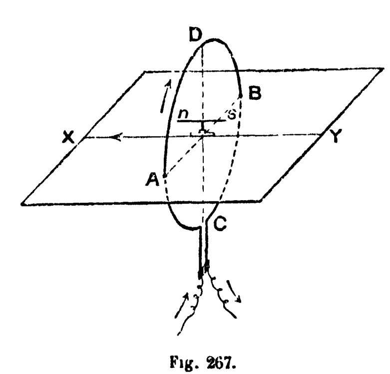


Fig. 267.

Remarque. — Le système de lignes de force que représente la figure 266 est tout à fait semblable à celui que produirait une

(*) Le spectre magnétique ne se produit bien qu'avec un courant intense; on peut également, si l'on ne dispose que d'un courant de quelques ampères, faire faire au fil une vingtaine de tours, au lieu du tour unique indiqué sur la figure.

plaque de tôle d'acier aimantée, remplissant l'intérieur du contour circulaire ACBD, et qui posséderait une couche de *magnétisme nord* sur la *face gauche* du courant circulaire fermé, et une couche de magnétisme sud sur l'autre face. — Cette assimilation d'un courant à un aimant, au point de vue du champ magnétique produit, est complète. Nous appellerons donc, par analogie, *face nord* d'un courant circulaire plan, celle devant laquelle il faudrait se placer pour voir le courant tourner en sens inverse des aiguilles d'une montre (*); l'autre face sera la *face sud*. C'est de la face nord qu'émanent les lignes de force du champ magnétique produit

294. ***Champ magnétique d'une bobine. — Solénoïde.*** — Considérons maintenant un courant passant dans un fil conducteur enroulé en hélice sur une bobine à section circulaire (*fig.* 268). — A *l'intérieur* de la bobine, la forme des lignes de force magnétique est donnée par le spectre formé par la limaille de fer, sur une feuille de carton que l'on y aura introduite. — A *l'extérieur*, ces lignes de force se ferment sur elles-mêmes, comme celles d'un aimant.

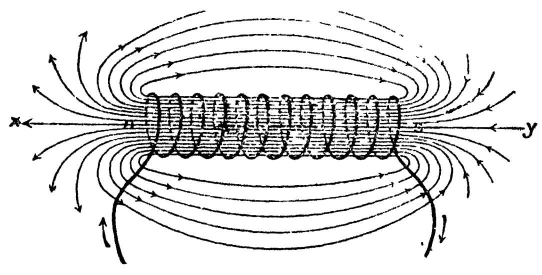


Fig. 268.

Ce champ magnétique présente dans *l'intérieur de la bobine* une propriété remarquable : sauf au voisinage des extrémités, *il est uniforme* (283), comme le montre la disposition des grains de limaille, qui s'alignent en formant des droites parallèles. Les lignes de force sortent de la bobine par l'extrémité devant laquelle il faut se placer pour voir le courant tourner en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre; si donc on place en x une aiguille aimantée, elle sera soumise à des forces tendant à l'orienter suivant xy, son pôle nord du côté de x et son pôle sud vers la bobine. L'extrémité n de la bobine se comporte donc comme un pôle nord d'aimant; on verrait de même que l'extrémité s possède les propriétés d'un pôle sud.

(*) Un pôle nord d'aimant, placé devant cette face, est repoussé; un pôle sud, au contraire, est attiré; les effets sont inverses si l'on opère devant la face sud du courant.

On appelle *solénoïde* (du grec *sôlênoeïdês*, en forme de canal) un pareil système de courants circulaires.

295. ***Un solénoïde est assimilable à un aimant.*** — Diverses expériences permettent de vérifier qu'un solénoïde se comporte comme un véritable aimant.

Suspendons horizontalement un solénoïde à un fil fin et très long (1 mètre) de soie ou de coton (*fig.* 269); le fil métallique isolé(*) qui constitue le solénoïde est replié aux deux extrémités et ramené vers la région médiane suivant une génératrice du solénoïde, puis courbé à angle droit en *a* et en *a'*. Pour faire passer le courant dans le solénoïde, on fait arriver les deux extrémités du fil dans un godet en bois contenant du mercure, et divisé par une cloison circulaire en deux parties, l'une centrale, dans laquelle plonge l'extrémité *a*, l'autre annulaire dans laquelle plonge l'extrémité *a'*; des lames de cuivre font communiquer ces deux cavités pleines de mercure avec deux bornes *b* et *b'*, qui sont en relation avec les pôles d'une pile. On obtient ainsi un système très mobile.

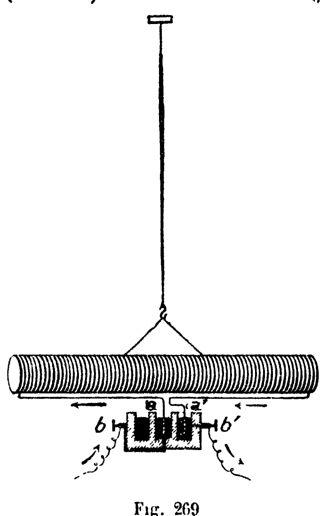


Fig. 269

Aussitôt que le courant de la pile est établi (quelques ampères suffisent), on voit le solénoïde s'orienter dans le plan du méridien magnétique, l'extrémité qui se dirige vers le nord étant celle devant laquelle il faut se placer pour voir le courant tourner en sens inverse des aiguilles d'une montre (*fig.* 270). —

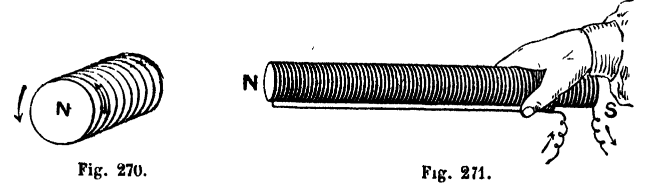


Fig. 270. Fig. 271.

Si, du pôle nord de ce solénoïde, on approche le pôle nord d'un autre solénoïde (*fig.* 271) tenu à la main (**), on constate une répulsion

(*) En employant de l'aluminium, on obtient des solénoïdes très légers.

(**) Il suffit de rouler un fil de cuivre isolé, sur un tube de verre ou sur une tige de bois, et d'y faire passer un courant.

comme entre les pôles nord de deux aimants. Les deux pôles sud se repoussent également. On constate, au contraire, que deux pôles d'espèces différentes s'attirent. — En remplaçant l'un des deux solénoïdes par un aimant, on obtiendrait des résultats identiques

II. — Galvanomètre à aimant mobile.

296. ***Principe du galvanomètre***. — Le galvanomètre est un instrument destiné à mesurer l'intensité des courants. Il est constitué, en principe, de la manière suivante :

Au centre d'un circuit circulaire (*fig*. 272), *orienté dans le plan du méridien magnétique*, on suspend horizontalement, au moyen d'un fil de cocon sans torsion, un très petit barreau aimanté; ce barreau se

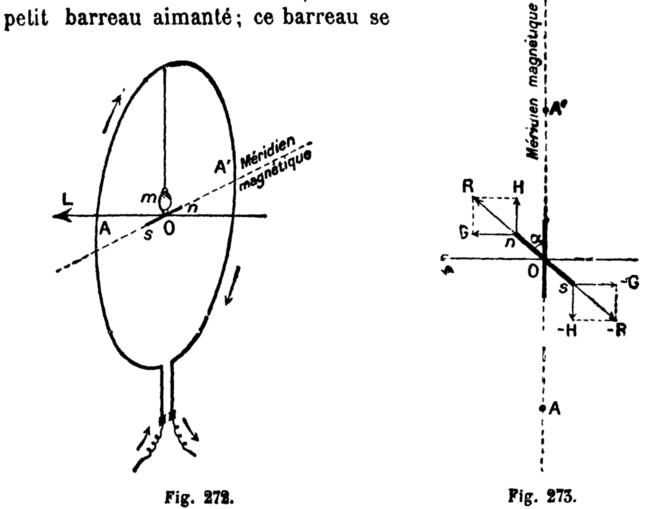


Fig. 272. Fig. 273.

dirige dans le plan du circuit, sous l'influence du champ magnétique terrestre. Quand le courant passe dans le circuit, il crée un champ magnétique dont les lignes de force, au centre du circuit, sont sensiblement des droites perpendiculaires au plan du courant (OL est la ligne de force qui passe au centre O); d'après la règle d'Ampère, le pôle nord doit se porter à la gauche du courant (291). — Représentons à part (*fig*. 273) une coupe de l'appareil par le plan horizontal AOLA′ qui contient le barreau. Le pôle nord n est soumis à deux forces : l'une H, due à la composante horizontale du champ terrestre, l'autre G due au courant et parallèle à la ligne

de force centrale OL; le pôle sud est soumis à des forces égales et contraires (288). En somme, l'aimant *ns* est soumis à deux couples de sens contraires : l'un *moteur*, G, — G, d'origine électromagnétique, qui tend à l'orienter perpendiculairement au plan du courant; l'autre *antagoniste*, H, — H, dû au champ magnétique terrestre, et qui tend, au contraire, à le maintenir dans le plan du courant; ces deux couples composants admettent un couple résultant R, — R dont la force R est la résultante de G et de H. Le barreau, soumis au couple R, — R, prendra une position d'équilibre telle que son axe magnétique *ns* soit orienté suivant la direction de R, faisant un angle α avec sa direction primitive. Un petit miroir concave *m* (*fig.* 272) collé contre le barreau aimanté permet de mesurer cet angle par la méthode de la réflexion (33). La déviation α croîtra avec la force G, car, dans le triangle rectangle R*n*H, dont le côté *n*H est constant, l'angle aigu en *n* croît avec la longueur du côté opposé RH ou G.

297. ***L'intensité du champ magnétique, au centre d'un courant circulaire, est proportionnelle à l'intensité du courant et inversement proportionnelle au rayon du cercle.*** — Reprenons le courant circulaire représenté figure 272, et intercalons-le dans un circuit comprenant un voltamètre à eau acidulée, et un électromoteur (piles ou accumulateurs). Le barreau aimanté étant supposé très court (quelques millimètres pour un courant de 50 cm de diamètre, par exemple), on peut admettre sans erreur appréciable que, dans l'espace où il peut se mouvoir, le champ du courant circulaire est sensiblement uniforme. La déviation α (*fig.* 273) est donnée par la formule

$$\boxed{\operatorname{tg}\alpha = \frac{G}{H}.}$$

Si *m* est l'intensité du pôle nord du barreau, si g et $\mathcal{H}$ sont respectivement les intensités du champ dû au courant en O, et de la composante horizontale du champ terrestre, on aura (282), $G = mg$ et $H = m\mathcal{H}$; par suite,

$$(1) \qquad \boxed{\operatorname{tg}\alpha = \frac{mg}{m\mathcal{H}} = \frac{g}{\mathcal{H}}}$$

*la déviation **ne** dépend pas de la valeur des pôles du barreau; sa tangente est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique créé par le courant, et en raison inverse de la composante horizontale du champ magnétique terrestre.*

Le voltamètre permet de connaître, en ampères, l'intensité I du courant qui donne cette déviation α. — Donnons à l'intensité (par l'addition ou la suppression de résistances auxiliaires), des valeurs

différentes I′, I″ etc., et soient α', α'', etc., les déviations correspondantes; la mesure des intensités et des déviations montre que

$$\frac{\mathrm{tg}\,\alpha}{\mathrm{I}} = \frac{\mathrm{tg}\,\alpha'}{\mathrm{I}'} = \frac{\mathrm{tg}\,\alpha''}{\mathrm{I}''} = \text{Constante}: \tag{2}$$

mais si l'on appelle g, g', g'' les intensités correspondantes du champ magnétique créé par le courant circulaire en son centre, on a également, d'après l'équation (1) :

$$\frac{g}{\mathrm{tg}\,\alpha} = \frac{g'}{\mathrm{tg}\,\alpha'} = \frac{g''}{\mathrm{tg}\,\alpha''} = \mathcal{H} = \text{Constante}; \tag{3}$$

en multipliant membre à membre les équations (2) et (3), il vient :

$$\frac{g}{\mathrm{I}} = \frac{g'}{\mathrm{I}'} = \frac{g''}{\mathrm{I}''} = \text{Constante}. \tag{4}$$

Le champ magnétique d'un courant circulaire est donc proportionnel à l'intensité de ce courant.

En faisant passer le même courant dans deux circuits circulaires de rayons différents, on montrerait d'une manière semblable que *l'intensité du champ magnétique d'un courant circulaire, en son centre, est inversement proportionnelle au rayon du cercle; on* pourra donc écrire

$$g = \mathrm{K}\,\frac{\mathrm{I}}{r}, \tag{5}$$

K étant une constante.

On peut déterminer la valeur numérique de K de telle sorte que, I étant exprimé en *ampères* et r en *centimètres*, g soit, comme $\mathcal{H}$, exprimé en *gauss*. Il suffit de mesurer avec précision α, $\mathcal{H}$, I et r; la formule (1) qui devient ici

$$\mathrm{tg}\,\alpha = \mathrm{K}\,\frac{\mathrm{I}}{r\mathcal{H}}, \tag{6}$$

permet de calculer K; on trouve ainsi :

$$\mathrm{K} = 0{,}628 = \frac{2\pi}{10}, \text{ d'où } g = \frac{2\pi}{10}\,\frac{\mathrm{I}}{r}.$$

De la formule (6), on déduit alors la formule suivante donnant l'intensité, en *ampères*, en fonction de la déviation :

$$\mathrm{I} = \frac{10}{2\pi}\,\mathcal{H}\,r\,\mathrm{tg}\,\alpha. \tag{7}$$

298. ***Principe de la boussole des tangentes.*** — Il résulte de ce qu'on vient de voir que, si l'on fait passer un courant électrique dans un circuit circulaire, orienté dans le plan du méridien magné-

tique, et au centre duquel est suspendu horizontalement un très petit barreau aimanté, on pourra, *de la mesure de la déviation du barreau, déduire l'intensité du courant en ampères* : l'appareil ainsi réalisé prend le nom de *boussole des tangentes*. — L'emploi d'un seul courant circulaire donne un instrument trop peu sensible ; aussi, en pratique, le circuit comprend plusieurs tours de fil, enroulés sur un même cadre circulaire, et assez voisins les uns des autres pour qu'on puisse les considérer comme ayant leurs rayons égaux et leurs centres confondus. Le champ créé au centre de ce cadre portant n spires de fil sera, en gauss, pour un courant de I ampères, n fois plus grand que pour une seule spire ; il aura donc pour valeur

$$g = \frac{2n\pi}{10} \cdot \frac{I}{r} = \mathcal{H} \operatorname{tg} \alpha ;$$

l'intensité du courant, en fonction de la déviation, sera donnée, en *ampères*, par la formule :

$$I = \frac{10 r \mathcal{H}}{2\pi n} \operatorname{tg} \alpha,$$

où r sera exprimé en centimètres et $\mathcal{H}$ en gauss (à Paris, actuellement, $\mathcal{H}$ vaut sensiblement 0,2 gauss).

299. ***Galvanomètre de lord Kelvin.*** — Dans un grand nombre d'expériences, on utilise le galvanomètre simplement pour constater qu'il ne passe pas de courant dans un conducteur donné (par exemple, dans la mesure d'une résistance (237) par la méthode du pont de Wheatstone). Dans ce cas, on demande seulement au galvanomètre d'être extrêmement sensible.

Or, la déviation (*fig.* 273) sera d'autant plus grande, pour un courant d'intensité donnée, que la force électromagnétique G qu'il exerce sur le pôle n du barreau sera plus grande, et que l'action magnétique H due à la Terre sera plus petite.

Pour augmenter G, *on réduira autant que possible le rayon du courant circulaire*, puisque G est inversement proportionnelle à ce rayon. D'autre part, au lieu de former un seul tour avec le fil, on l'enroulera un grand nombre de fois sur une petite bobine, au centre de laquelle on suspendra l'aimant (*fig.* 274) ; tous ces tours de fil ajouteront leurs actions, et l'appareil pourra accuser l'existence de courants auxquels il eût été insensible avec un seul tour de fil. — Toutefois, l'augmentation exagérée du nombre des tours finit par présenter un inconvénient ; ou bien le fil est très fin, et alors la résistance de la bobine devient énorme ; ou bien le fil est de grosseur moyenne, et les spires extérieures sont alors trop éloignées de l'aimant pour avoir une action appréciable.

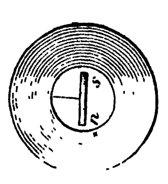


Fig. 274.

Aussi, pour accroître la sensibilité du galvanomètre, on s'applique à *diminuer la force directrice* H, exercée par la Terre sur chacun des pôles de l'aimant; on y arrive par deux procédés, que l'on peut employer séparément ou même à la fois.

Le premier procédé consiste à contre-balancer l'action du champ magnétique terrestre sur l'aimant, au moyen d'un aimant auxiliaire NS (*fig.* 275) dont le champ, dans la région occupée par l'aiguille, soit sensiblement égal et opposé au champ terrestre : cet aimant est désigné sous le nom d'*aimant compensateur*. Il est porte par une tige verticale le long de laquelle il peut glisser; la tige peut tourner sur elle-même autour de son axe, en sorte que l'aimant peut être orienté dans un azimut quelconque.

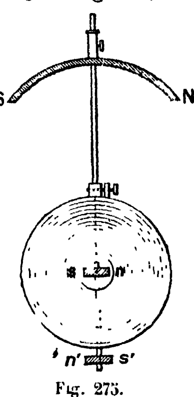


Fig. 275.

Le second procédé pour diminuer la force H due au champ magnétique terrestre, consiste à employer un système de deux aiguilles aimantées, *ns*, *n's'* (*fig.* 275) placées parallèlement, et fixées l'une à l'autre par une tige rigide, de manière que leurs pôles de noms contraires se correspondent. Le système est suspendu par un fil de cocon sans torsion; l'aiguille supérieure est placée à l'intérieur du cadre; l'aiguille inférieure est en dehors de la bobine. — Si les deux aiguilles étaient identiques, les actions exercées par la Terre sur leurs pôles se neutraliseraient toujours, quelle que fût l'orientation du système qu'elles forment, et ce système resterait en équilibre dans une position quelconque : elles constitueraient alors un système complètement *astatique*. En réalité, l'action de la Terre sur l'une des deux aiguilles est toujours un peu plus grande que sur l'autre, et l'action résultante est *la différence*, généralement très petite, de ces deux actions.

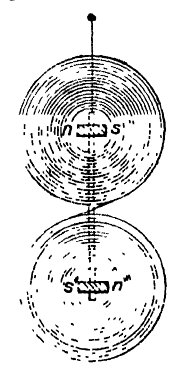


Fig. 276.

Enfin, pour augmenter encore la sensibilité de l'appareil, on place le second aimant *n's'* à l'intérieur d'une seconde bobine, et, pour que les actions du courant s'ajoutent, on le fait passer en sens inverse dans les deux bobines (*fig.* 276).

C'est en partant de ces considérations que lord Kelvin a établi un excellent modèle de galvanomètre, qui est actuellement le seul galvanomètre à aimant mobile d'un usage courant. La figure 277 représente une vue d'ensemble de l'appareil. — Les barreaux aimantés sont formés

chacun de cinq lames d'acier, de quelques millimètres de longueur, et disposées parallèlement (*fig.* 278); les deux groupes de lames, qui forment le système astatique, sont réunis entre eux par une tige d'aluminium, suspendue par un fil de cocon. Chacun des groupes d'aiguilles est au centre d'une bobine circulaire. — Pour mesurer les déviations, on fait usage de la méthode optique (33), en fixant un petit miroir métallique concave contre les lames d'acier du groupe supérieur (*).

Il n'est pas nécessaire d'orienter l'appareil dans le méridien magnétique : on peut l'orienter dans un azimut quelconque. Pour amener les aiguilles aimantées à se placer parallèlement aux tours du fil, il suffit de faire tourner autour de son axe vertical *l'aimant correcteur* NS, jusqu'à ce que le miroir fixé aux aiguilles se tienne en équilibre dans une position perpendiculaire aux axes des bobines.

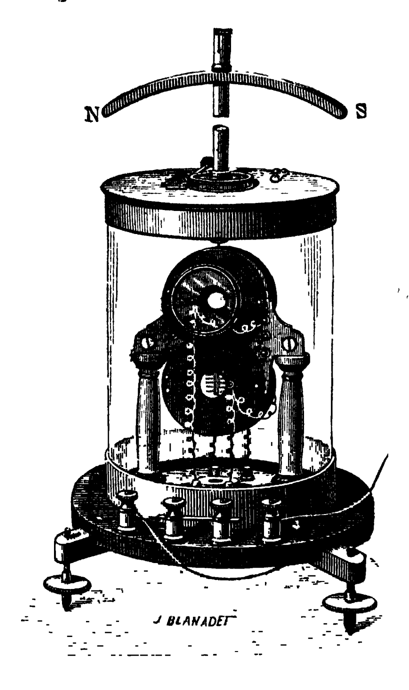


Fig. 277.

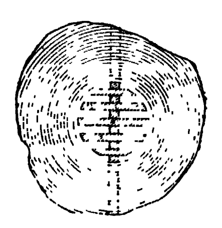


Fig. 278.

300. ***Shunt d'un galvanomètre.*** — Un galvanomètre déterminé ne peut servir que pour des courants dont l'intensité ne dépasse pas une certaine limite. En effet, d'une part, si la déviation est trop grande, elle cesse d'être observable par la méthode optique; d'autre part, un courant trop intense pourrait détériorer l'instrument. —

(*) Les déviations observées doivent toujours rester assez petites, car, avec une échelle divisée d'un mètre de long (50 cm de chaque côté de la position d'équilibre) et un miroir d'un mètre de rayon, la déviation maxima de l'équipage mobile que l'on puisse observer n'est que de 13°.

On appelle *shunt* d'un galvanomètre, un système de bobines qui pourra lui être annexé en dérivation (234), et qui permettra de réduire l'intensité à une valeur convenable.

Les deux fils qui amènent le courant aboutissent aux deux bornes A et B (*fig.* 279 et 280), d'où partent également les fils qui vont au galvanomètre ; entre les deux lames de cuivre qui portent les bornes A et B, est une cheville C semblable aux fiches d'une boîte de résistances (236), et par suite de résistance négligeable, par laquelle passe tout le courant, d'après la loi des circuits dérivés (234). En

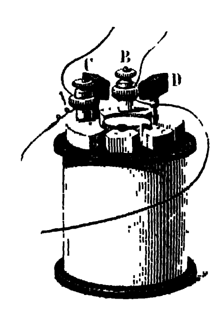


Fig. 279.

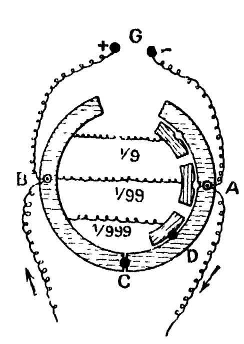


Fig. 280.

effet, d'après la relation $ir = i'r'$, r étant la résistance du galvanomètre et r' celle de la cheville, si r' est négligeable pour la cheville, on a $i = 0$ dans le galvanomètre, et tout le courant passe par r' ; l'aiguille reste donc au zéro. — Trois bobines, dont les résistances sont respectivement 1/9, 1/99 et 1/999 de celle du fil du galvanomètre, communiquent d'une part avec la borne B (la figure schématique 280 montre ces différentes communications), d'autre part avec les trois pièces de cuivre marquées 1/9, 1/99 et 1/999 : enfin, une deuxième cheville D peut faire communiquer, à volonté, l'une de ces trois pièces et la lame de cuivre A. Les chevilles étant disposées comme l'indique la figure 280, aucun courant ne passe dans le galvanomètre.

Supposons maintenant qu'on enlève la cheville C, qui est entre les deux bornes ; le courant se partagera entre le fil du galvanomètre, de résistance r, et la troisième bobine, de résistance $r' = \frac{r}{999}$: d'après la formule des courants dérivés, $i = I\frac{r'}{r + r'}$, on aura $i = \frac{I}{1000}$; il ne passera donc dans le galvanomètre que la millième partie du courant ; si la déviation est sensible, on en fera

la lecture.— Si la déviation est insensible, on replacera la cheville C entre les deux bornes, et on transportera la cheville D entre la pièce A et la pièce marquée 1/99; puis on enlèvera la première cheville. S'il y a une déviation, on l'observera. — Si, cette fois encore, la déviation n'était pas sensible, on replacerait encore la cheville C, on amènerait la cheville D entre la pièce A et la pièce 1/9, puis, retirant la première cheville, on ferait passer dans le galvanomètre la dixième partie du courant. — Enfin, si la déviation était encore insensible, on ferait passer dans le galvanomètre le courant tout entier, en retirant les deux chevilles.

301. ***Amortissement des oscillations. — Galvanomètres apériodiques.*** — Quand on fait passer un courant dans un galvanomètre, l'aiguille ne prend une position déterminée, sous l'action du courant, qu'après un grand nombre d'oscillations : elle passe *périodiquement* par sa position d'équilibre, alternativement dans un sens et dans l'autre, et ne se fixe qu'au bout d'un temps assez long. Il en est de même pour le retour au *zéro*.

Pour abréger la durée des mesures, on a dû chercher a *amortir* les oscillations, c'est-à-dire à faire décroître rapidement les amplitudes successives, de telle sorte que, au bout d'un temps assez court, l'aiguille arrive sensiblement au repos, dans sa position d'équilibre (*). — Or, nous verrons (333) que tout déplacement d'un aimant, par rapport à un circuit conducteur voisin, fait naître dans ce circuit un *courant induit*, dont le sens est tel que, en réagissant sur l'aimant, il contrarie son mouvement. On comprend dès lors que, dans un galvanomètre quelconque, les courants induits qui, à chaque oscillation de l'aimant, prennent naissance dans le fil même du galvanomètre, doivent produire un amortissement des oscillations. Pour que les amplitudes des oscillations décroissent rapidement, il faut, d'une part, faire en sorte que les courants induits soient aussi intenses que possible; d'autre part, donner au système mobile une faible masse et de petites dimensions. — D'après ces indications, on a pu, non seulement réaliser des appareils, comme le galvanomètre de lord Kelvin, dans lesquels les oscillations s'amortissent rapidement, mais même construire des galvanomètres *apériodiques* (312), dans lesquels les oscillations sont complètement supprimées.

302. ***Mesure de l'intensité d'un courant avec le galvanomètre.*** — Bien que le galvanomètre soit souvent employé pour constater qu'aucun courant ne passe dans un conducteur, on peut avoir à l'utiliser pour mesurer l'*intensité* d'un courant. Comme la déviation, au moins quand elle reste inférieure à une dizaine de degrés, est proportionnelle à l'intensité, on se bornera à déterminer l'intensité i

(*) La résistance de l'air, qui contrarie le mouvement des pièces mobiles, produit un amortissement sensible, mais insuffisant dans la plupart des cas.

qui correspond à une déviation donnée, en introduisant simultanément le galvanomètre, *shunté au besoin*, et un voltamètre à azotate d'argent ou à eau acidulée, dans le circuit d'une pile de force électromotrice constante; le voltamètre donnera l'intensité en ampères et l'on notera la déviation correspondante. On en déduira l'intensité qui produit sur la règle une déviation d'une division.

303. ***Mesure d'une quantité d'électricité avec le galvanomètre. — Galvanomètre balistique.*** — Lorsqu'on fait passer dans un galvanomètre la décharge d'un condensateur, l'aiguille est soumise à une force instantanée, c'est-à-dire qu'elle subit un choc; elle s'écarte brusquement de sa position d'équilibre, et, après avoir décrit un certain arc d'impulsion, elle y revient par une série d'oscillations. Si la décharge est assez rapide pour que l'aiguille ne se soit pas sensiblement déplacée pendant sa durée, le calcul permet d'établir que l'arc d'impulsion θ de l'aiguille est *proportionnel* à la quantité m d'électricité qui passe dans la décharge; on peut donc écrire :

$$\theta = A.m.$$

Un galvanomètre employé de cette manière prend le nom de *galvanomètre balistique*. — Il est facile de déterminer la valeur de A, de telle sorte que θ étant la déviation lue sur la règle, la quantité m soit donnée en coulombs. Pour cela, on pourra charger un condensateur de capacité connue, en établissant une différence de potentiel connue (obtenue au moyen d'éléments Daniell, par exemple) entre ses armatures, et on le déchargera dans le galvanomètre balistique; on fera passer ainsi dans le galvanomètre un nombre connu de coulombs, et la déviation correspondante pourra être lue sur la règle. Nous indiquerons plus loin un autre moyen permettant de faire passer, dans le galvanomètre, une quantité connue d'électricité (340).

Il est évident qu'un galvanomètre balistique ne doit avoir qu'un faible amortissement.

304. ***Choix du galvanomètre, selon l'usage auquel il est destiné.*** — On construit des galvanomètres à fil *gros et court*, ou à fil *long et fin*, selon l'usage auquel ces instruments sont destinés.

Lorsqu'on opère avec des sources n'offrant qu'une résistance très faible, le galvanomètre ne doit présenter lui-même qu'une résistance assez petite pour ne pas trop affaiblir le courant; on doit donc employer un galvanomètre à fil relativement *gros et court*. Ce fil ne fait alors qu'un petit nombre de tours sur la bobine (deux ou trois cents, par exemple).

Au contraire, lorsque la résistance du circuit extérieur au galvanomètre est très grande, il y a avantage à employer une bobine comportant un grand nombre de spires, c'est-à-dire à fil *long et fin*.

Dans ces galvanomètres *à grande résistance*, le fil fait plusieurs milliers de tours sur son cadre. — On construit des galvanomètres portant jusqu'à 30 000 tours de fil et ayant une résistance de 8000 à 10 000 ohms; avec ces appareils, un courant de 10^{-9} ampère peut produire, sur l'échelle divisée placée à une distance d'un mètre, une déviation de 5 centimètres.

305. ***Galvanomètres industriels : ampèremètres, voltmètres.*** — Pour les mesures industrielles, on emploie des galvanomètres auxquels on donne le nom d'*ampèremètres* ou de *voltmètres*, selon l'usage auquel ils sont destinés.

La forme des uns et des autres est celle que représente la figure 281. — A l'intérieur d'une boîte cylindrique, est un petit barreau de fer doux *ab*, mobile autour d'un axe formé par une tige rigide dont une extrémité s'applique sur le fond de la boîte, l'autre extrémité étant maintenue par un bouton extérieur. Quand l'appareil n'est pas en expérience, le barreau *ab* s'oriente dans le champ magnétique que produisent deux aimants fixes, AB, A'B' dont les pôles de même nom sont placés côte à côte; une aiguille légère, fixée à l'axe de rotation du barreau, s'arrête alors au zéro de la graduation. La bobine est fractionnée en deux parties C, D, sur lesquelles s'enroule un même fil aboutissant à deux bornes fixes P (+) et N (—). Supposons que le courant passe; si les aimants fixes n'existaient pas, le barreau, aimanté par le champ magnétique des bobines, se dirigerait suivant l'axe des bobines; soumis à l'action des aimants fixes, et à l'action électromagnétique du courant, il prend une position intermédiaire s'écartant d'autant plus de sa position primitive, que le courant est plus intense.

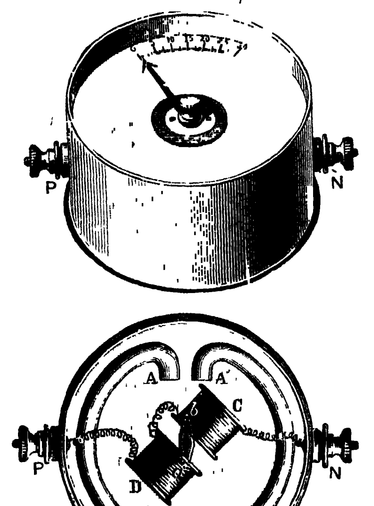


Fig. 281.

Les *ampèremètres* et les *voltmètres* ne diffèrent entre eux que par la résistance du fil des bobines, et par le mode de graduation du cadran sur lequel se meut l'aiguille.

Dans les *ampèremètres*, qui sont destinés à des mesures d'*inten-*

sites de courant, les bobines sont *à très gros fil*. L'instrument étant intercalé, par ses bornes P et N, dans le circuit qui est l'objet de l'expérience, sa résistance ne modifie pas, d'une manière appréciable, l'intensité du courant dans ce circuit. Le cadran est gradué *en ampères*, par comparaison avec un instrument étalon (*). Il est bien évident que l'on peut munir l'ampèremètre d'un shunt (300), et utiliser alors l'appareil pour la mesure de courants très intenses que les bobines ne pourraient supporter en totalité.

Dans les *voltmètres*, qui sont destinés a mesurer la *différence de potentiel* entre deux points A et B (*fig.* 282) d'un circuit *parcouru par un courant*, les bobines sont *à fil très fin et très long*. Sans rien déranger au circuit soumis à l'expérience, on met les bornes du voltmètre G en communication, par des conducteurs assez courts, avec les points A et B, de façon à constituer ainsi *une dérivation*. L'instrument ayant une résistance très grande par rapport à celle de AB, cette dérivation ne modifie pas, d'une manière appréciable, le courant primitif, ni les potentiels, dans le reste du circuit. Dès lors, si l'on désigne par v la différence de potentiel entre les points A et B, par r la résistance de l'instrument, et par i l'intensité du courant dans le voltmetre, on aura (216) la relation $v = ir$. Donc, pour un même instrument, l'intensité, et par suite la déviation, ne dépendra que de la différence de potentiel v, puisque r est constant. — Le cadran est gradué en *volts* (**).

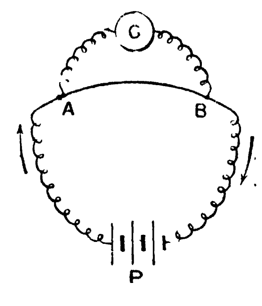


Fig. 282.

III. — Action d'un champ magnétique sur un courant. Galvanomètre à cadre mobile.

306. ***Orientation d'un courant sous l'action du champ magnétique terrestre.*** — Nous avons vu (293, *Remarque*) qu'un courant circulaire peut être assimilé à une feuille d'acier, limitée au contour du courant, et dont une des faces serait recouverte de magnétisme sud et l'autre de magnétisme nord, cette dernière étant celle devant

(*) On pourrait, à la rigueur, appliquer le procédé indiqué plus haut pour la graduation d'un galvanomètre (302).

(**) Pour graduer un voltmètre, on le met en dérivation entre deux points A et B d'un circuit parcouru par un courant d'intensité I connue; si l'on connait en outre la résistance R de la portion AB du circuit, la différence de potentiel entre A et B aura pour valeur $V = IR$: on répétera l'expérience en faisant varier l'intensité et en laissant fixe la résistance R, et l'on inscrira sur le cadran le voltage correspondant.

laquelle il faut se placer pour voir le courant tourner en sens inverse des aiguilles d'une montre (*fig.* 283).

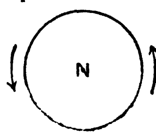


Fig. 283.

Rendons un tel circuit mobile, au moyen du mode de suspension décrit précédemment (295), puis lançons un courant de quelques ampères (un élément au bichromate suffit). Le circuit se met en mouvement; après quelques oscillations, il s'oriente dans le champ terrestre, de telle sorte que son plan soit perpendiculaire au plan du méridien magnétique, la *face nord* du courant étant dirigée vers le nord magnétique (*fig.* 284). — On peut répéter l'expérience, avec un courant plan de contour quelconque, rectangulaire, elliptique, etc., elle donne le même résultat.

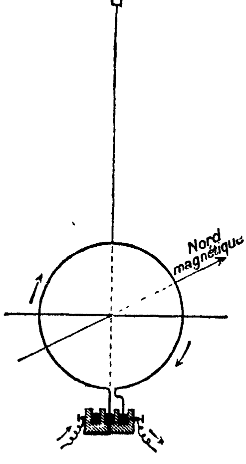


Fig. 284.

Remarque. — On pourrait faire agir sur un tel courant plan, le champ magnétique d'un aimant *ns* placé suivant le diamètre horizontal du cercle (*fig* 285); le courant s'oriente de telle sorte que l'aimant soit perpendiculaire à son plan, son pôle nord étant, suivant la règle d'Ampère, à la gauche du courant.

307. *Direction de l'action électromagnétique d'un champ sur un courant. — Règle pratique pour la déterminer.* — La direction de tous les mouvements observés dans les diverses expériences où l'on fait agir un champ

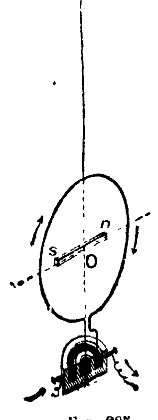


Fig. 285.

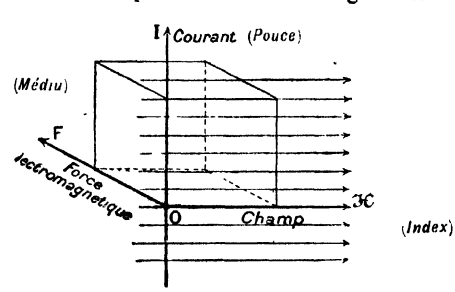


Fig. 286

magnétique sur un courant, peut être prévue par une règle pra-

tique, qui est une conséquence de la règle d'Ampère (291).

L'observateur d'Ampère faisant face à la région d'où viennent les lignes de force du champ (région nord du champ), la force électromagnétique perpendiculaire au plan du courant et du champ sollicite le courant vers la droite de cet observateur (*). — La figure 286 représente ces diverses directions dans le cas où le courant est perpendiculaire au champ. On a figuré les trois directions considérées, et, pour rendre la figure plus claire, on a représenté en perspective un cube dont trois arêtes concourantes sont précisément ces directions.

308. ***Loi de l'action électromagnétique. — Formule de Laplace.*** — Laplace (**) a déduit, d'expériences que nous ne rapporterons pas ici, une formule qui donne la grandeur de la force électromagnétique.

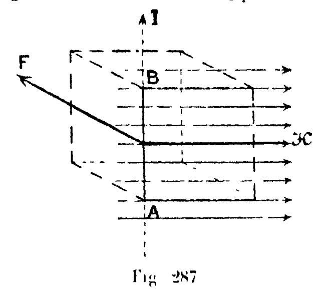


Fig. 287

Si une portion d'un courant rectiligne AB, de longueur l et dont l'intensité est I, est placée perpendiculairement aux lignes de force d'un champ magnétique d'intensité $\mathcal{H}$ (*fig.* 287), elle est soumise à une force électromagnétique dont la direction est donnée par la règle précédente, et dont la valeur est :

$$F = \frac{1}{10} I \mathcal{H} l \text{ dynes},$$

où I est exprimé en *ampères*, $\mathcal{H}$ en *gauss* (282), et l en *centimètres*.

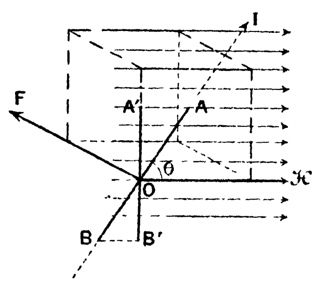


Fig. 288.

Si la direction du courant fait un angle θ avec la direction du champ (*fig.* 288), il suffit dans la formule de substituer, à la longueur BA $= l$, la projection B'A' $= l \sin\theta$ de cette longueur sur la perpendiculaire au champ située dans le plan du courant et du champ; la force F est

(*) On a donné plusieurs énoncés permettant de trouver la direction de cette force, le suivant qu'on appelle la *règle des trois doigts* (*main droite*) est quelquefois d'une application simple. Le *pouce* de la *main droite* étant dirigé dans le sens du *courant*, l'*index* dans le sens des *lignes de force du champ*, si on place le *médius* perpendiculairement au plan du pouce et de l'index, il indique la *direction de la force* (*fig.* 286).

(**) Laplace (1749-1827), illustre mathématicien français, immortalisé par ses travaux mathématiques appliqués à l'astronomie : *Traité de mécanique céleste*, *Exposition du système du monde*. En Physique, outre la loi fondamentale de l'électromagnétisme, il a indiqué une formule permettant de calculer la vitesse du son dans les gaz.

d'ailleurs toujours perpendiculaire au plan qui passe par le courant et qui contient la direction du champ; dans ce cas

$$F = \frac{1}{10} I \mathcal{H} l \sin \theta \text{ dynes.}$$

Remarque. — On peut remarquer que le produit $\mathcal{H}l$, ou en général $\mathcal{H} l \sin \theta$, n'est autre chose que *l'aire du parallélogramme* dont l'angle au sommet est θ, et dont les côtés sont la *longueur* l de la portion de courant considérée et une *longueur mesurée par le même nombre* $\mathcal{H}$ que celui qui mesure le champ en gauss; la force F est perpendiculaire au plan de ce parallélogramme.

309. ***Applications.*** — La règle énoncée plus haut (307) permet, dans tous les cas, de déterminer le sens de la force électromagnétique à laquelle un courant est soumis de la part d'un champ magnétique d'origine quelconque, aimant ou courant. — On verrait d'abord sans peine qu'elle s'applique à l'orientation d'un courant circulaire vertical, par le champ magnétique terrestre. — Examinons encore quelques cas particuliers.

Roue de Barlow. — On produit la *rotation continue* d'une portion de courant mobile, dans l'expérience de la *roue de Barlow* (*fig.* 289). — Un disque de cuivre est mobile autour d'un axe métallique C, qui communique par le fil B avec le pôle négatif d'une pile; ce disque plonge très peu dans du mercure, contenu dans une auge DF, et qui communique par le fil A avec le pôle positif de la pile : dans ces conditions, le courant est ascendant dans la partie inférieure de la roue et dirigé suivant un rayon. Au moment où l'on ferme le circuit, l'action d'un aimant en fer à cheval, dont les deux branches N et S sont fixées de part et d'autre de l'auge DF, imprime à la roue un mouvement de rotation continue. Le sens de la rotation est celui des aiguilles d'une montre, pour un observateur placé du côté du pôle nord N : c'est bien le sens qu'indique la règle énoncée plus haut (307). — Si l'on renverse le sens du courant, la rotation se produit en sens inverse.

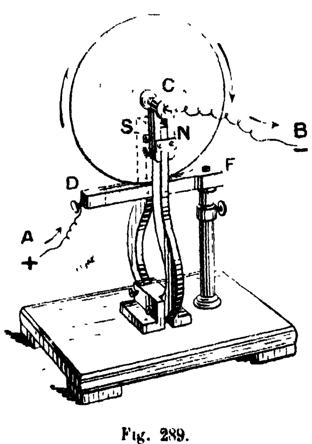


Fig. 289.

Cas de deux courants rectilignes et parallèles. — Supposons d'abord les deux courants de même sens, et cherchons quelle est l'action exercée sur l'un d'eux par le champ magnétique de l'autre.

L'observateur d'Ampère sera en MN (*fig.* 290) et regardera dans la direction d'où viennent les lignes de force qui le rencontrent; sa droite sera dans la direction MF; donc *deux courants rectilignes parallèles et de même sens s'attirent.*

On verrait de même que, si le courant AB change de sens, l'observateur devra se retourner de 180° autour de MN, puisque les lignes de force auront changé de sens; la force électromagnétique aura aussi changé de sens; par suite il y aura *répulsion*

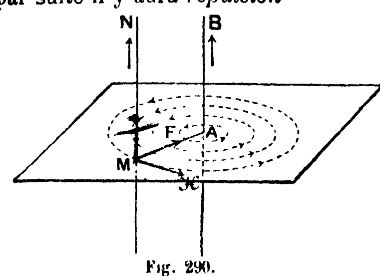


Fig. 290.

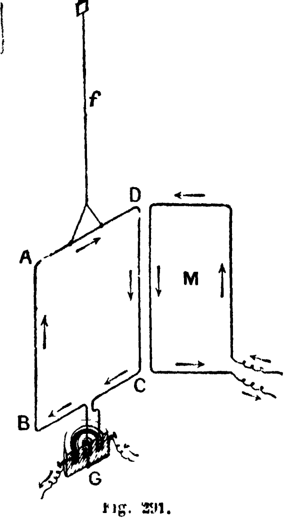


Fig. 291.

On peut vérifier expérimentalement ces conclusions : ABCD (*fig.* 291) est un circuit rectangulaire, suspendu par un fil de coton fin *f*, et dont les extrémités plongent dans un double godet G déjà décrit (295); d'autre part, on a enroulé, sur un cadre rectangulaire M, plusieurs tours d'un fil métallique isolé, dans lequel on fait passer un courant. Si l'on approche de CD le côté vertical de M, dans lequel le courant est descendant, on constate une *attraction*; si au contraire, on approche de CD le côté de M dans lequel le courant est ascendant, il y a *répulsion*.

Nous étudierons plus loin un moteur industriel fondé sur la loi de l'action électromagnétique (359).

Fig. 292

310. ***Travail de la force électromagnétique.*** — Si une portion rectiligne de courant AA′, de longueur *l*, se déplace parallèlement à elle-même de AA′ en BB′ (*fig.* 292), dans la direction de la force que le champ ℋ exerce sur AA′, le point O d'application de cette

force se déplace d'une longueur s et vient de O en O'; la force F accomplit un certain travail mécanique $F \times s$. Remplaçons F par sa valeur en dynes (308) et évaluons s en cm; le travail Fs se trouve alors exprimé au moyen de l'unité C.G.S., de travail, ou *erg*, qui vaut 10^{-7} joule; le travail cherché exprimé en joules sera donc

$$W = \frac{1}{10^8} \mathcal{H} I l s \text{ joules.}$$

Mais on peut remarquer que ls est la surface AA'BB', balayée par la longueur l glissant de s parallèlement à elle même, et perpendiculairement à sa direction; par suite $\mathcal{H}ls$ est le flux de force magnétique (284) qui traverse la surface ls; si l'on représente ce flux par Φ, on aura :

$$W = \frac{1}{10^8} I\Phi \text{ joules,}$$

Φ étant exprimé en *maxwells*, et I en ampères.

Cette formule remarquable est due à Faraday; nous venons de l'établir en supposant le courant perpendiculaire au champ, et le déplacement effectué dans la direction de la force électromagnétique, mais *elle est générale* : on peut donc énoncer la règle suivante :

Si une portion rectiligne de courant, placée dans un champ magnétique, se déplace, le travail, en joules. accompli par la force que le champ exerce sur le courant, est égal au quotient par 10^8 *du produit de l'intensité du courant par le flux de force magnétique coupé par le courant mobile, c'est-à-dire le flux de force qui traverse la surface balayée par la portion de courant, pendant son déplacement.*

Appliquons cette règle de Faraday à la roue de Barlow. Quand la roue a fait un tour, *le conducteur parcouru par le courant* (c'est un rayon de la roue) a balayé une surface πr^2, en appelant r le rayon du disque : si le champ *supposé uniforme* est perpendiculaire au plan de la roue, le travail accompli, pendant ce tour, par la force électromagnétique, aura pour expression :

$$W = \frac{1}{10^8} \pi r^2 I \mathcal{H} \text{ joules.}$$

Ce travail va s'emmagasiner dans la roue, dont la vitesse augmentera progressivement jusqu'à ce que la résistance due aux frottements divers absorbe ce travail moteur (on pourrait d'ailleurs lui faire remonter un poids suspendu à un fil enroulé sur l'axe); alors la roue continuera à tourner avec une vitesse constante.

La puissance d'un pareil *moteur électrique* est, s'il fait n tours par seconde,

$$P = nW = \frac{1}{10^8} \pi r^2 n I \mathcal{H} \text{ watts,}$$

formule dans laquelle r est exprimé en centimètres, I en ampères et $\mathcal{H}$ en gauss.

311. ***Force électromotrice inverse du moteur électrique constitué par la roue de Barlow.*** — La roue de Barlow, considérée comme moteur, absorbe une certaine quantité de travail électromagnétique; on pourrait se demander quelle est l'origine de l'énergie ainsi mise en jeu. A priori, *nous ne le savons pas, et aucun raisonnement ne permet de le prévoir*; mais une expérience très simple et d'une importance capitale va nous le montrer. Plaçons, dans le circuit d'une pile de quelques éléments à force électromotrice constante (des accumulateurs par exemple), une roue de Barlow et un ampèremètre: empêchons la roue de tourner en la tenant à la main; l'ampèremètre indique une certaine intensité I du courant; abandonnons la roue à elle-même; lorsque la vitesse est *constante*, l'ampèremètre indique une intensité $I' < I$; or la résistance du circuit n'a pas changé, la force électromotrice de la pile est restée également constante; il a donc dû se développer dans le circuit une *force électromotrice inverse* : la roue de Barlow en mouvement joue, par suite, le rôle d'un récepteur à contre-force électromotrice (231). L'énergie absorbée dans ce récepteur est prélevée sur celle du courant qui l'alimente; et le mécanisme par lequel se fait cette absorption d'énergie, consiste dans *l'apparition d'une force électromotrice inverse* proportionnelle au flux coupé par seconde par la portion mobile du courant, comme nous allons le montrer maintenant. Chaque coulomb qui traverse l'appareil y abandonne une certaine énergie, y produit un certain travail; or par seconde il passe I coulombs; et le travail fourni est P joules; donc la force électromotrice inverse (231) est, par définition, $e = \frac{P}{I}$, ou d'après l'expression de P (310),

$$e = \frac{1}{10^8}\pi r^2 n \mathcal{H} \text{ volts.}$$

D'ailleurs $\frac{1}{10^8}\pi r^2 n \mathcal{H}$ n'est autre chose que *le quotient par* 10^8 *du flux coupé par seconde, par la portion de courant dont le conducteur se déplace dans le champ.*

En se reportant à la formule de Faraday (310), on voit immédiatement que cet énoncé est général; en effet, chaque coulomb qui passe laisse disponible dans le moteur un travail égal à $\frac{W_1}{I}$, W_1 étant le travail laissé disponible par seconde; ce travail W_1 a donc pour expression $\frac{\Phi_1}{10^8}$, Φ_1 étant le flux coupé pendant qu'il passe I cou-

lombs, c'est-à-dire pendant une seconde; par suite, la force électromotrice inverse d'un moteur électrique est, d'une façon générale,

$$e = \frac{\Phi_1}{10^8} \text{ volts},$$

Φ_1 étant le flux coupé par seconde, par le courant mobile.

312. ***Galvanomètre de Deprez et d'Arsonval, à cadre mobile.*** — Dans ce galvanomètre, dont la figure 293 représente un schéma, et la figure 294 une vue d'ensemble, c'est le cadre qui est mobile autour d'un axe formé par deux fils métalliques *a*, *a'*, tendus verticalement dans le prolongement l'un de l'autre : ce sont ces fils eux-mêmes

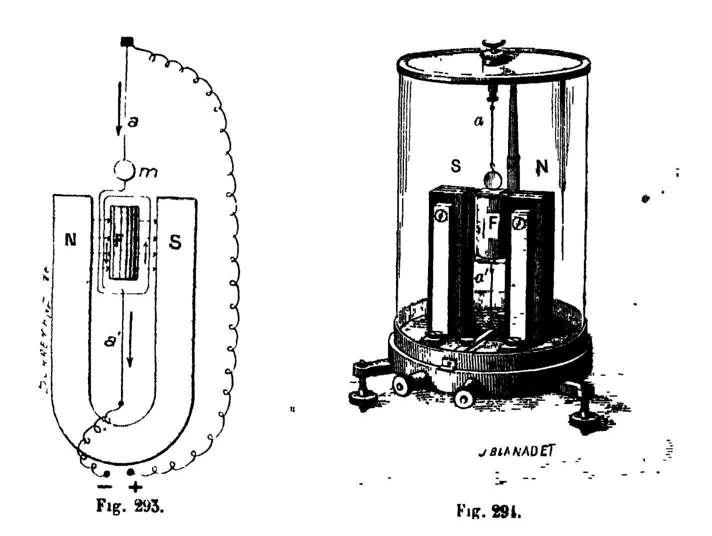


Fig. 293. Fig. 294.

qui servent à la transmission du courant. Le cadre est placé entre les branches N, S d'un aimant fixe en fer à cheval : à l'intérieur du cadre est un cylindre creux de fer doux F, indépendant de lui, et fixé à un support qui est masqué sur la figure. Ce cylindre de fer doux s'aimante par influence (316), par suite, l'intensité du champ magnétique dans l'entrefer (espace compris entre les pôles de l'aimant et le cylindre de fer doux) est augmentée; il en est de même de la force électromagnétique qui est proportionnelle au champ.

L'appareil est réglé de façon que, lorsqu'il n'est pas en expérience, la torsion du fil métallique place le plan du cadre parallèlement à la ligne menée d'un pôle à l'autre de l'aimant fixe. — Lorsqu'on y fait passer un courant, le cadre est dévié, dans un sens ou dans l'autre,

selon le sens du courant, et tend à se placer perpendiculairement aux lignes de force du champ, comme on peut le voir facilement, en appliquant aux côtés verticaux du cadre la règle énoncée plus haut (307); mais, à mesure que la déviation augmente, la torsion éprouvée par le fil augmente également, et arrive a faire équilibre aux actions électromagnétiques. Le couple *moteur* est donc, comme dans le galvanomètre à aimant mobile (296), un couple d'origine électromagnétique; mais le couple *antagoniste* n'est pas dû au champ terrestre, il provient de la torsion éprouvée par le fil a quand le cadre tourne autour de aa'. L'intensité du courant est sensiblement proportionnelle à la déviation. — On mesure l'angle de déviation par la méthode optique (33), au moyen d'un petit miroir m fixé au cadre.

La propriété caractéristique de ce galvanomètre est d'être *apériodique*, c'est-à-dire de prendre immédiatement sa position d'équilibre : en effet, en raison de l'intensité du champ magnétique créé par l'aimant NS dans l'espace où se meut le cadre, les courants d'*induction*(*) qui naissent dans le cadre pendant son mouvement, et qui tendent à s'opposer au mouvement, sont soumis, de la part du champ, à une action électromagnétique qui est toujours intense, si la résistance du circuit extérieur n'est pas trop considérable. — De même, pour le retour au zéro, il suffit, en supprimant le courant, de fermer le circuit du galvanomètre sur lui-même, par exemple par la cheville C de son shunt (300); le retour au zéro est immédiat, et se fait sans oscillations.

313. *Ampèremètres et voltmètres à cadre mobile.* — Le principe du galvanomètre à cadre mobile a été appliqué à la construction d'ampèremètres et de voltmètres industriels. La figure 295 représente une des dispositions adoptées. N et S sont les pièces polaires en fer doux d'un aimant permanent de forme annulaire; entre ces deux pièces on a ménagé une cavité cylindrique dans laquelle se trouve logé un cylindre de fer doux F. Dans l'entrefer, peut se mouvoir un cadre galvanométrique C

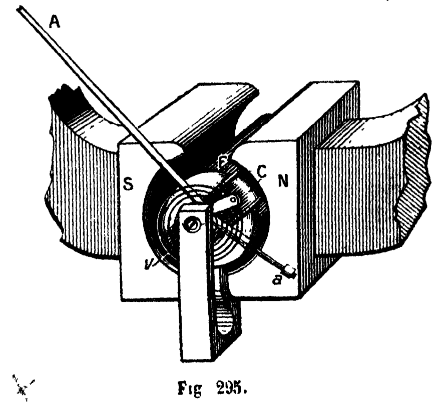


Fig 295.

(*) Nous expliquerons un peu plus loin la production de ces courants.

dans lequel passe le courant; au milieu de ses deux côtés avant et arrière, ce cadre est muni de deux pivots qui réalisent un axe de rotation.

Lorsque, sous l'influence du courant à mesurer, le cadre tourne autour de son axe, le couple antagoniste, qui tend à le ramener à sa position primitive d'équilibre, n'est plus dû, comme dans le galvanomètre (312) à la torsion du fil de suspension, qui a disparu, ce couple est fourni par deux ressorts spiraux, en métal non magnétique, montés sur l'axe, l'un *v* (*fig.* 295), en avant, l'autre, non figuré, en arrière du cadre; en sorte que le cadre monté sur pivots et muni de ses deux ressorts spiraux est analogue au balancier à spiral des montres. Ces ressorts servent en outre de conducteurs pour amener le courant au cadre mobile.

Une aiguille d'aluminium A, solidaire de l'axe, et équilibrée par un petit contrepoids *a* indique sur un cadran l'intensité du courant.

Le système mobile devant rester très léger, il ne pourra être question d'enrouler sur le cadre un fil de cuivre un peu gros; aussi emploie-t-on un fil très fin qui ne peut, par suite, supporter que des courants très faibles; il est donc nécessaire d'adjoindre à l'ampèremètre un *shunt*, ou *réducteur d'intensité* convenablement établi, ce réducteur est en général formé d'une lame de maillechort montée en dérivation entre les bornes de l'ampèremètre; c'est cette lame que l'on aperçoit en *a b* (*fig.* 218), sous l'ampèremètre qui est monté sur le rhéostat.

Les *voltmètres à cadre mobile* sont analogues aux ampèremètres que l'on vient de décrire, à cela près que le cadre est toujours recouvert de fil très fin, et dont on multiplie autant que possible le nombre de tours, puisque le voltmètre doit être très résistant (305), néanmoins, on ne pourrait avoir une résistance totale suffisante (une centaine d'ohms par volt à mesurer), qu'en chargeant outre mesure le cadre mobile; aussi, le courant passe non seulement dans le cadre, mais dans une résistance auxiliaire convenable montée en série avec le cadre.

Il est évident que tous ces appareils peuvent, comme les balanciers des montres, fonctionner dans n'importe quelle position.

Les ampèremètres et les voltmètres à cadre mobile sont, comme les instruments à bobine fixe, gradués par comparaison avec des instruments étalons.

CHAPITRE V

AIMANTATION PAR LES CHAMPS MAGNÉTIQUES

I. — Champ magnétique à l'intérieur d'un aimant.

314. ***La notion de champ magnétique peut s'étendre à l'intérieur d'un aimant.*** — Reportons-nous à l'expérience qui donne le spectre magnétique du champ d'un solénoïde ; les lignes de force sortent de l'extrémité nord, se recourbent, rentrent dans le solénoïde par l'extrémité sud, et le traversent d'un bout à l'autre en formant un faisceau serré de lignes droites parallèles (*fig.* 296), la limaille de fer nous permet de suivre le trajet de ces lignes de force à l'intérieur de la bobine.

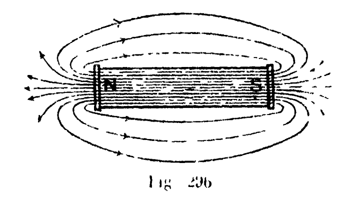


Fig. 296

La valeur en *gauss* du champ à l'intérieur de la bobine, aux points où il est uniforme, est donnée par une formule que nous nous bornerons à indiquer, sans l'établir,

$$\mathcal{H} = \frac{1}{10} 4 \pi n_1 I, \quad \text{ou sensiblement} \quad \mathcal{H} = 1,25\, n_1 I \text{ gauss},$$

en prenant $\frac{4\pi}{10} = 1,25$. Dans cette formule, n_1 est le nombre de tours de fil par centimètre de longueur de la bobine, et I l'intensité du courant en ampères. — Le produit $n_1 I$ est ce qu'on appelle le nombre d'*ampères-tours par centimètre* et le produit NI du nombre total de tours par l'intensité est le *nombre d'ampères-tours de la bobine*.

Appliquons cette formule à l'exercice suivant : *Combien faut-il de couches de fil sur une bobine longue, pour que l'intensité du champ, au centre, soit de* 100 *gauss ; le fil employé a* 0,15 *cm de diamètre et ne peut, à cause de l'échauffement, supporter plus de* 2 *ampères.*

De la formule ci-dessus on tire :

$$n_1 = \frac{\mathcal{H}}{1,25\, I}, \quad \text{ou } n_1 = 40.$$

Par centimètre, on pourra loger, pour chaque couche, un nombre de tours de fil égal à $\frac{1}{0,15}$; pour en avoir en tout 40, il faudra autant de couches de fil que 40 contient de fois $\frac{1}{0,15}$, c'est-à-dire $40 : \frac{1}{0,15} = 6$. Il faudra donc 6 couches de fil.

Comparons, à ce spectre magnétique d'un solénoïde, celui d'un barreau d'acier *long* et *mince* (*fig.* 297). A l'extérieur du barreau,

l'aspect est le même ; les lignes de force partent de l'extrémité nord, se recourbent et vont aboutir à l'extrémité sud. Le spectre ne pouvant rien indiquer dans l'intérieur du barreau, nous pouvons imaginer que l'analogie des deux spectres est complète et que les lignes de force se ferment, à travers le barreau comme à travers le solénoïde, en formant dans l'acier un faisceau serré de lignes droites, parallèles au moins dans la région médiane du barreau. — A la vérité, il nous est impossible de pénétrer dans l'intérieur d'un aimant pour nous assurer de la légitimité de cette hypothèse ; mais l'expérience de l'aimant brisé (274) peut la justifier dans une certaine mesure. L'aimant NS étant brisé en son milieu, on dresse à la meule les deux sections produites ; on les applique exactement l'une contre l'autre, et l'on fait le spectre de l'aimant ; l'expérience montre qu'il a la même forme qu'avant la rupture. Si l'on écarte alors les deux moitiés de quelques millimètres, et qu'on fasse de nouveau le spectre, on trouve qu'il a l'aspect représenté figure 298 ; entre les deux surfaces en regard, dans l'entrefer *ns*, on aperçoit un faisceau très serré de lignes de force, révélant l'existence d'un champ intense et sensiblement uniforme, et cela d'autant plus nettement que l'entrefer est plus mince. On peut donc admettre qu'à la limite, lorsque les deux surfaces d'acier sont en contact, les lignes de force continuent à exister à l'intérieur du métal.

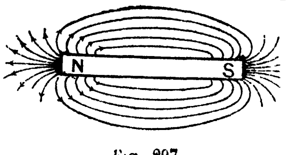


Fig 297.

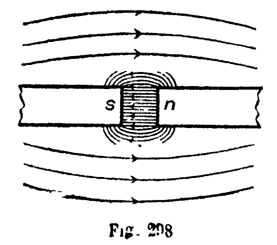


Fig. 298

315. ***Lignes d'induction. — Induction. — Flux d'induction.*** — Nous conviendrons d'appeler *lignes d'induction magnétique*, ou simplement *lignes d'induction*, ces lignes qui, à l'intérieur de l'aimant, réunissent les extrémités d'une même ligne de force extérieure. Cette existence de lignes de force à l'intérieur de l'aimant entraîne l'existence d'un champ magnétique : l'intensité de ce champ a reçu le nom d'*induction* ; on représente habituellement l'induction par la lettre $\mathfrak{B}$; elle s'évalue naturellement en *gauss*, comme l'intensité d'un champ magnétique ordinaire.

Nous appellerons de même *flux d'induction* à travers une surface S normale aux lignes d'induction le produit $\Phi = \mathfrak{B}.\,S$; c'est l'analogue du flux de force magnétique défini plus haut (284). Comme le flux de force magnétique, il se mesure en maxwells (*).

(*) Ce flux d'induction peut être effectivement mesuré à travers la section mé-

Remarque. — La région que nous avons appelée *région nord* d'un aimant est celle par laquelle les lignes d'induction sortent de l'aimant pour devenir les lignes de force du champ extérieur ; la *région sud* est celle à travers laquelle les lignes de force rentrent dans le fer et redeviennent lignes d'induction. Briser l'aimant, c'est créer une surface *n* par laquelle les lignes d'induction vont être obligées de sortir de l'aimant, et une autre surface *s* par laquelle elles rentreront dans le milieu métallique, c'est-à-dire que la rupture crée deux nouveaux pôles *n* et *s*, comme nous l'avons d'ailleurs constaté précédemment (274).

II. — Aimantation du fer et de l'acier.

316. ***Aimantation temporaire du fer**, sous l'influence d'un aimant.* — Prenons un petit barreau de *fer doux*, c'est-à-dire de fer pur qui n'a pas été écroui par le travail du marteau, et, après avoir constaté qu'il n'attire pas la limaille de fer, mettons-le à une petite distance du pôle nord N d'un aimant (*fig.* 299). Ses extrémités acquièrent la propriété d'attirer la limaille de fer, c'est-à-dire que le petit barreau de fer *s'aimante*. — Pour savoir comment sont disposés ses pôles, on peut, sans le déplacer, approcher de son extrémité *n* le pôle nord d'une aiguille aimantée, mobile sur un pivot : on observe une répulsion, d'où l'on conclut que l'extrémité *n* contient un pôle nord. — L'autre extrémité *s* contient un pôle sud.

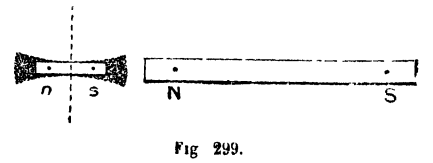


Fig 299.

Mais cette aimantation du fer n'est pas persistante; dès qu'on éloigne l'aimant NS, le barreau de fer revient à l'état neutre et abandonne la limaille qui s'y était fixée. En réalité, le barreau reste aimanté, il garde une fraction de son magnétisme ; mais ce magnétisme, qui a reçu le nom de *magnétisme rémanent*, disparaît sous l'influence de causes insignifiantes, telles qu'un léger choc, ou mieux par l'action d'un champ magnétique très faible, de sens contraire à celui que produisait le barreau NS.

Cette expérience capitale nous explique la formation des spectres magnétiques, avec leurs lignes de limaille dessinant les lignes de force du champ : chaque grain de limaille devient un véritable aimant, et se dirige tangentiellement à la ligne de force, comme le ferait une petite aiguille aimantée (279).

317. ***Attraction du fer doux par un aimant.*** — On comprend que, si le petit barreau de fer *ns* est abandonné à lui-même, à une

diane totale de l'aimant, en utilisant les phénomènes d'induction électromagnétique dont nous dirons quelques mots plus loin.

petite distance de l'aimant NS, l'attraction exercée par le pôle N sur le pôle voisin *s* arrive à l'entraîner. Il s'attache alors à l'aimant, et y reste suspendu, si son poids n'est pas trop considérable.

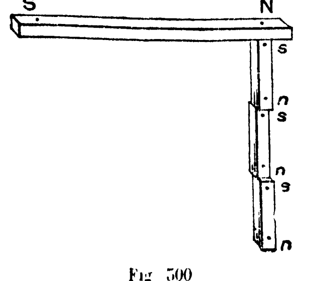


Fig. 300

Mais, le barreau de fer étant maintenant devenu un aimant, on peut lui en présenter un second, sur lequel il agit à son tour de la même manière, et ainsi de suite. — C'est par une succession d'actions semblables qu'on peut suspendre au pôle d'un aimant (*fig.* 300) une série de morceaux de fer doux, dont chacun s'aimante sous l'influence de celui qui le précède. — Cependant les morceaux de fer successifs prennent une aimantation de plus en plus faible, et ils cessent bientôt d'en pouvoir soutenir de nouveaux.

C'est ainsi encore que les grains de limaille de fer s'attachent les uns aux autres, autour des pôles d'un aimant (*fig.* 244).

318. ***Aimantation permanente de l'acier, par influence. — Force coercitive.*** — Un barreau d'acier trempé, placé dans les mêmes conditions que le barreau de fer doux *ns* (*fig.* 299), s'aimante comme lui; cette aimantation ne disparaît pas complètement quand on éloigne l'aimant qui avait servi à la produire; comme dans le fer doux, une fraction plus ou moins grande du magnétisme développé par influence persiste : c'est le *magnétisme rémanent.*

Mais au contraire de ce qui se passe avec le fer doux, ce magnétisme rémanent, plus faible que dans le cas du fer doux, est plus difficile à faire disparaître; des chocs, même violents, n'ont à peu près aucun effet; pour ramener le barreau d'acier à l'état neutre; il faut, ou le chauffer au rouge blanc, ou le soumettre à l'action d'un champ magnétique de sens contraire à celui qui l'avait aimanté.

On donne le nom de *force coercitive* à cette propriété que possèdent le fer doux et l'acier de conserver du magnétisme rémanent, et l'on mesure cette force coercitive par l'intensité du champ contraire nécessaire pour ramener le barreau à l'état neutre; cette intensité est beaucoup plus grande pour l'acier trempé que pour le fer doux.

De ces expériences, il résulte donc ce fait général qu'*un morceau de fer doux, ou d'acier, placé dans un champ magnétique, s'aimante; il prend un pôle nord dans le sens des lignes de force du champ, et un pôle sud en sens inverse* (*).

(*) Le champ magnétique terrestre suffit pour aimanter un morceau de fer; l'expérience montre que toutes les pièces de fer qui existent à la surface de la Terre présentent des pôles, comme on peut s'en assurer au moyen d'une petite aiguille aimantée; la région nord est celle qui regarde dans la direction des lignes de force du champ terrestre.

319. Développement du magnétisme par les courants. — On vient de voir que des tiges de fer ou d'acier, placées dans le champ magnétique créé par un aimant, acquièrent une aimantation temporaire ou permanente. Puisqu'un courant crée autour de lui un champ magnétique, il doit faire naître l'aimantation dans un corps magnétique placé dans ce champ. — Les expériences suivantes montrent qu'il en est ainsi.

320. Aimantation permanente de l'acier par un courant. — Si l'on place une aiguille d'acier dans un tube de verre, autour duquel

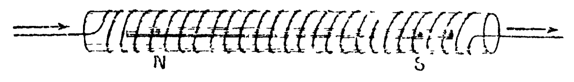


Fig. 301

on aura enroulé en hélice un fil métallique (*fig.* 301), et si l'on fait passer un courant dans le fil pendant quelques instants, on constate que l'aiguille est aimantée. Le pôle nord N se développe *à la gauche de chacun des courants circulaires* (293), ou, comme nous l'avons dit déjà, *à l'extrémité devant laquelle il faut se placer pour que le sens des courants circulaires paraisse inverse de celui du mouvement des aiguilles d'un montre.* C'est l'extrémité par laquelle les lignes de force sortent de l'hélice magnétisante (*).

321. Aimantation temporaire du fer doux par un courant. — Électro-aimants. — D'après ce qui précède, un barreau de *fer doux* (*fig.* 302), placé dans l'axe d'une bobine formée par un fil conducteur, se comportera comme un aimant quand le fil sera parcouru par un courant; il retombera à l'état neutre quand le courant sera interrompu. On pourra donc y faire naître ou supprimer à volonté l'aimantation. — Le système prend le nom d'*électro-aimant*, ou, par abréviation, *électro*.

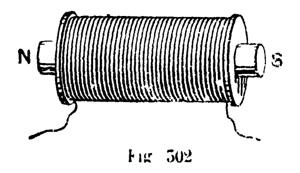


Fig. 302

322. ***Étude de l'aimantation du fer dans un champ uniforme. — Notion de perméabilité.*** — Lorsqu'on transforme un barreau de fer ou d'acier en un aimant temporaire ou permanent, en le soumettant à l'influence d'un champ magnétique, on cherche, en général, à produire dans ce barreau une *induction* déterminée (315), ou, si l'on veut, à lui communiquer une certaine *intensité d'aimantation* (290);

(*) Arago a constaté qu'on peut encore aimanter une aiguille d'acier, placée dans une hélice, en faisant passer dans cette hélice les décharges d'une machine électrique ou d'une batterie.

nous dirons maintenant quelques mots de la relation qui existe entre *l'intensité* $\mathcal{H}$ *du champ magnétisant* et *l'induction* $\mathcal{B}$ produite dans le fer soumis à l'influence de ce champ. Nous nous bornerons à examiner sommairement ce qui se passe, seulement dans le cas où le champ magnétisant est uniforme.

Le spectre magnétique d'un aimant en fer à cheval montre que

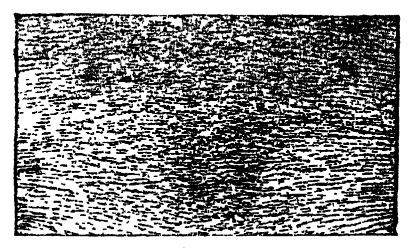


Fig. 303.

le champ est sensiblement uniforme dans une assez grande partie de la région comprise entre les deux branches (*fig.* 303), puisque les lignes de force y sont des droites parallèles. Plaçons dans cette région un barreau de fer doux; si l'on fait de nouveau le spectre magnétique avec de la limaille de fer, on voit

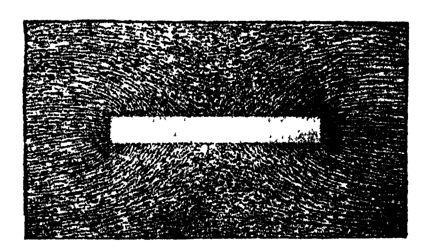


Fig. 304.

(*fig.* 304) que les lignes de force, tout à l'heure rectilignes et parallèles, se courbent, se déforment pour venir passer en plus grand nombre dans le barreau; on exprime ce fait en disant que le fer doux est un milieu *perméable* aux lignes de force. Dans l'espace occupé par le fer du barreau, *les lignes d'induction* (prolongements dans le fer des lignes de force du champ extérieur) sont beaucoup plus serrées que précédemment, quand ce volume était occupé par de l'air; par suite, *l'intensité du champ magnétique*, ou, ce qui revient au même, *l'induction* dans cet espace s'est accrue notablement par la substitution du fer à l'air; le flux à travers une sec-

tion droite de ce volume, occupé par le barreau, est lui-même beaucoup plus grand, puisqu'il a pour valeur le produit $\mathcal{B}S$ de l'induction par la surface de la section, tandis que précédemment il n'avait pour valeur que $\mathcal{H}S$. En somme, le flux magnétique passe plus facilement à travers le fer qu'à travers l'air; le fer est plus *perméable* que l'air pour le flux magnétique (*).

L'expérience montre encore un résultat intéressant. Dans la figure 304, le barreau de fer doux est supposé placé *en long* dans le sens des lignes de force; si on le place *en travers*, perpendiculairement aux lignes de force, et qu'il soit mobile sur un pivot, à la façon d'une aiguille aimantée, il s'oriente de lui-même de telle sorte que *sa plus grande dimension soit parallèle aux lignes de force du champ primitif*; on dirait que les lignes de force le font tourner pour pouvoir suivre dans le fer le plus long chemin possible.

323. ***Cas où l'influence est produite par le champ magnétique intérieur d'un solénoïde.*** — Considérons un solénoïde NS dont les spires, serrées les unes contre les autres, sont parcourues par un courant d'intensité I. — Nous avons vu (295) que ce solénoïde constitue un véritable aimant, sans fer; les grandeurs que nous avons appelées *induction*, *flux d'induction* (315), dans le cas d'un aimant d'acier, ne sont ici pas autre chose que l'intensité $\mathcal{H}$ du champ intérieur, et le flux de force magnétique $\mathcal{H}s$ à travers une surface donnée, prise à l'intérieur de la bobine.

La valeur du champ est calculable *a priori*, en partant de la formule de Laplace; elle est représentée par la formule déjà indiquée (314)

$$\mathcal{H} = \frac{1}{10} 4 \pi n_1 \mathrm{I} \text{ gauss } (**).$$

Introduisons dans la bobine un barreau de fer doux de même diamètre que la bobine, mais *limité en longueur à la portion uniforme du champ*: à cause de la perméabilité du fer, *l'induction* (intensité du champ dans le fer soumis à l'influence) sera beaucoup plus grande que $\mathcal{H}$. Posons $\mathcal{B} = \mu\mathcal{H}$; μ est ce qu'on appelle le *coefficient de perméabilité* du fer, dans les conditions de l'expérience.

Quand l'air remplissait la bobine, avant l'introduction du fer, on avait $\mathcal{B} = \mathcal{H}$, c'est-à-dire que le coefficient de perméabilité de l'air

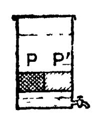


Fig. 305.

(*) Dans une fontaine filtrante (*fig* 305), dont la plaque poreuse serait formée de deux parties P et P', cette dernière plus poreuse que l'autre, le *flux d'eau* qui passerait à travers P' serait plus grand que celui qui passerait à travers P; la portion P' serait plus *perméable* que P. C'est cette analogie entre un flux de liquide et un flux magnétique qui fait concevoir comment on a pu appliquer le mot de *perméabilité* aux propriétés magnétiques du fer.

(**) Avec les bobines que l'on emploie habituellement, la valeur de $\mathcal{H}$ ne peut guère dépasser quelques centaines de gauss.

est égal à l'unité; ou, plus exactement, l'on prend, comme unité de perméabilité, le coefficient de perméabilité de l'air.

La valeur du coefficient μ varie beaucoup d'un échantillon de fer à un autre; il est plus grand pour le fer doux que pour l'acier et surtout que pour la fonte; il dépend, en outre, du champ magnétisant. Les deux diagrammes ci-contre (*fig.* 306 et 307) donnent les valeurs de μ et celles de 𝔅 en fonction de ℋ pour du fer très doux, pour de la fonte grise, et pour de l'acier trempé.

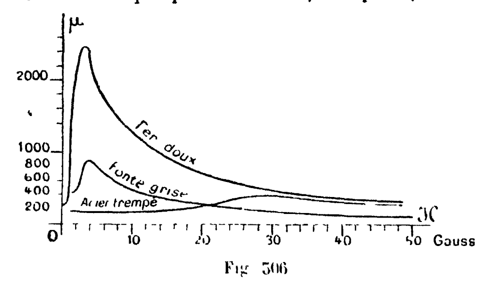


Fig 306

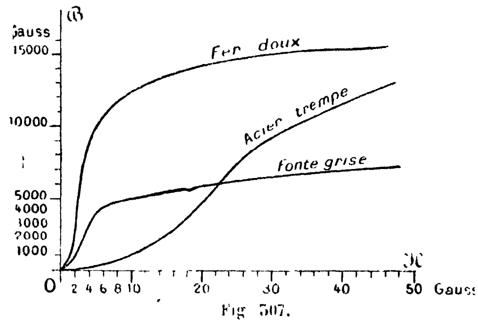


Fig 307.

On voit sur ces diagrammes que la *perméabilité* du fer doux croît d'abord beaucoup plus vite que le champ magnétisant, et passe ensuite par un maximum; puis, le champ magnétisant continuant à croître, la perméabilité décroît rapidement, et semble tendre vers une limite égale à 1, qui n'est pas encore atteinte pour un champ de 20000 gauss, et qui dépend de l'échantillon de fer employé. Ce résultat est important, car il montre qu'au delà d'une certaine limite le meilleur fer doux n'est pas plus perméable que l'air : quand cet état est atteint, on dit que *le fer est aimanté à saturation.*

Quant à l'*induction magnétique* 𝔅 dans le fer doux, elle croît d'abord aussi beaucoup plus vite que le champ magnétisant (*); puis l'accroissement devient moins rapide, et pour des valeurs suffisamment grandes du champ magnétisant l'expérience montre que l'augmentation d'induction est simplement égale à l'augmentation du champ; une augmentation donnée du champ n'augmente pas beaucoup plus l'induction que si la bobine ne contenait pas de fer.

(*) Cet accroissement est tellement rapide que pour ne pas avoir des ordonnées de longueur démesurée dans la figure 307, on a pris l'échelle des ordonnées 500 fois plus petite que celle des abscisses.

La saturation est alors près d'être atteinte. — On peut se rendre compte de ce fait en considérant l'induction $\mathcal{B}$ produite dans le fer doux d'une bobine par un champ magnétisant $\mathcal{H}$, comme la somme de deux termes, l'un, $\mathcal{H}$, induction due à la bobine elle-même, et l'autre dû au fer (la théorie montre d'ailleurs que cette seconde partie a pour valeur $4\pi\mathcal{I}$, $\mathcal{I}$ étant l'intensité d'aimantation (290) du barreau de fer doux). Cette dernière croît d'abord rapidement, puis tend vers une valeur limite fixe, qu'elle prend lorsque le champ atteint la valeur qui correspond à la saturation du fer; si l'on fait croître le champ magnétisant au delà de cette valeur, le terme dû au fer n'augmente plus, et l'accroissement de $\mathcal{B}$ est simplement égal à l'accroissement du champ magnétisant $\mathcal{H}$.

On a figuré sur les diagrammes (*fig.* 306 et 307) les valeurs de μ et de $\mathcal{B}$ pour la fonte grise et l'acier trempé; on voit l'avantage qu'il y a à employer des noyaux d'électros en fer aussi doux que possible, la fonte ayant des propriétés magnétiques très inférieures à celles du fer. Néanmoins, en raison du faible prix de revient et des facilités de moulage de la fonte, on s'est souvent servi de la fonte pour construire les noyaux des électros employés dans les machines dynamo-électriques; actuellement on sait préparer, à un prix relativement peu élevé, des aciers doux qui peuvent se mouler comme la fonte, mais dont les propriétés magnétiques se rapprochent de celles du fer doux; aussi l'emploi de la fonte est-il à peu près abandonné dans l'industrie électrique.

Dans le cas de l'acier trempé, l'induction croît d'abord beaucoup plus lentement que pour le fer doux, et même que pour la fonte; mais sa valeur au moment de la saturation n'est pas beaucoup inférieure à celle du fer doux.

324. *Phénomènes d'hystérésis.* — Nous n'avons envisagé jusqu'ici que le cas d'un barreau de fer doux soumis à un champ magnétisant donné. En pratique, dans les machines dynamo-électriques que nous étudierons plus loin, un même noyau de fer est soumis à l'influence d'un champ magnétisant qui varie périodiquement et d'une façon continue entre deux valeurs égales et de sens contraires; l'aimantation du fer se complique alors beaucoup, elle présente une particularité singulière, que l'on désigne sous le nom d'*hystérésis*.

Supposons que le noyau de fer doux d'une bobine très longue *n'ait jamais été aimanté*; faisons passer dans la bobine un courant d'intensité I progressivement croissante; I étant exprimé en ampères, il se produit dans la bobine un champ magnétisant $\mathcal{H} = \frac{1}{10} 4\pi n_1 I$ gauss, proportionnel à I, il en résulte, pour le noyau de fer, une certaine induction $\mathcal{B}$ progressivement croissante; supposons que l'on ait mesuré cette induction, et construisons la courbe qui représente les variations de $\mathcal{B}$ en fonction de $\mathcal{H}$, c'est-à-dire un diagramme analogue à celui de la figure 307; nous obtiendrons une branche de courbe telle que OA (*fig.* 308). Pour des champs faibles, $\mathcal{B}$ croît

d'abord lentement, puis beaucoup plus vite, pour atteindre une valeur déterminée $\mathcal{B}_1$ lorsque le champ magnétisant atteint sa valeur maximum $\mathcal{H}_1$. Faisons maintenant décroître le champ; l'expérience montre que, le champ reprenant une certaine valeur $\mathcal{H}'$, l'induction $\mathcal{B}'_1$ est supérieure à l'induction $\mathcal{B}'$ qui tout à l'heure correspondait à cette même valeur $\mathcal{H}'$, quand le champ est redevenu égal à zéro, l'induction conserve une certaine valeur OC. Le fer ne s'est donc pas désaimanté, il a gardé un certain magnétisme : c'est le *magnétisme rémanent* ; sa valeur dépend du champ maximum $\mathcal{H}_1$ auquel le barreau a été soumis, et surtout de l'échantillon du métal sur lequel on opère.

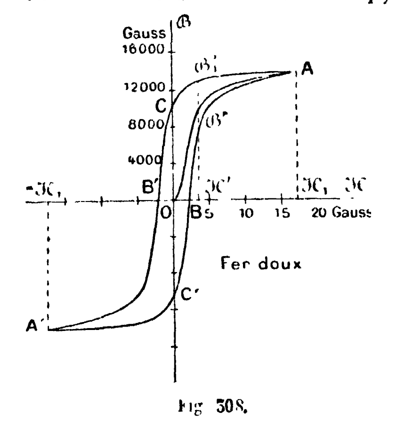


Fig. 308.

Continuons à faire décroître le champ, il change de sens, l'induction diminue, et, pour une certaine valeur négative OB' du champ, l'induction devient nulle; le champ correspondant s'appelle *champ coercitif*, et on peut le prendre comme mesure de ce que nous avons appelé *force coercitive* (318) (*) A partir de ce moment, l'induction continue à décroître avec le champ, et,

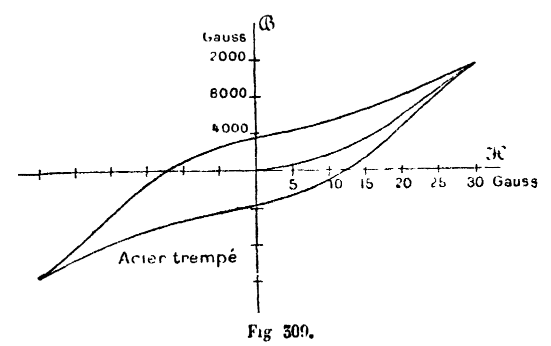


Fig. 309.

pour une valeur du champ $-\mathcal{H}_1$, l'induction atteint une valeur sensiblement égale à $-\mathcal{B}_1$. Si l'on fait maintenant revenir le champ de $-\mathcal{H}_1$ à $+\mathcal{H}_1$, l'induction est représentée par la branche de courbe A'C'BA; en particulier, pour $\mathcal{H}=0$, l'on a, à très peu près, $OC' = -OC$. Si l'on

(*) Avec le fer doux, l'induction rémanente est très grande, et le champ coercitif faible ; au contraire, pour l'acier trempé, l'induction rémanente est plus faible (la moitié de celle du fer, à peu près, pour $\mathcal{H}_1 = 240$ gauss), mais le champ coercitif est beaucoup plus grand ; c'est ce qu'on peut voir facilement sur les figures 308 et 309 ; la première se rapporte à du fer doux, et la seconde à de l'acier trempé.

recommence indéfiniment la même série d'opérations, le point figuratif de l'induction décrit indéfiniment la même courbe AC B'A'C'BA, on dit que le fer parcourt un *cycle magnétique fermé*. Pour caractériser ce cycle, on indique l'induction maximum $\mathcal{B}_1$ qui a été réalisée dans le fer

Il résulte de ces faits d'expérience que, à une même intensité du champ magnétisant, correspond pour le fer une induction qui dépend non seulement de la valeur actuelle du champ, mais des états magnétiques antérieurs de l'échantillon de fer sur lequel on opère, pour une même valeur du champ magnétisant, l'intensité est plus grande lorsque le champ décroît que lorsqu'il croît, l'induction *retarde* sur le champ magnétisant, d'où le nom d'*hystérésis* (du grec *ustereô*, je retarde) sous lequel on désigne ce phénomène (*).

325. ***Dépense d'énergie dans l'aimantation.*** — L'aimantation d'un noyau de fer absorbe une partie de l'énergie électrique du courant excitateur, mais seulement pendant que l'aimantation s'établit. Une fois produite, l'aimantation n'exige aucun travail pour être maintenue; autrement dit, pendant que l'induction du noyau de fer passe de la valeur zéro à la valeur finale (ce temps est très court) l'électro joue le rôle d'un *récepteur* d'énergie électrique à force électromotrice inverse; pendant cette période très courte d'établissement du courant, son intensité, à chaque instant, a une valeur plus faible que si la bobine ne contenait pas de fer. — Lorsque le courant excitateur diminue pour s'annuler finalement, son intensité est à chaque instant plus grande que si la bobine ne contenait pas de fer. L'électro-aimant joue à ce moment le rôle d'un *générateur*.

Pendant la désaimantation, l'électro-aimant rend bien une partie de l'énergie qu'il a ainsi absorbée, mais *l'expérience montre qu'il ne la rend pas toute car il s'échauffe*, et cela est une conséquence de l'hystérésis, l'énergie qui n'est pas restituée apparaît dans le fer sous forme de chaleur, non seulement inutilisable, mais nuisible; nous verrons un peu plus loin (338) qu'à cette cause de perte d'énergie sous forme de chaleur vient encore s'en ajouter une autre.

Si donc comme nous l'avons envisagé au paragraphe précédent, on soumet un noyau d'électro à une série d'aimantations et de désaimantations successives, il apparaîtra dans le noyau une certaine quantité de chaleur, l'énergie correspondante sera prélevée sur le courant excitateur. Le calcul montre que l'énergie, ainsi rendue inutilisable par sa transformation en chaleur, est proportionnelle à la surface enfermée dans la courbe AB'A'B (*fig.* 308); il est d'ailleurs visible sur les figures 308 et 309 que cette surface est d'autant plus grande que le *champ coercitif* OB' a une valeur plus grande. Il y aura donc, pour cette raison encore, avantage à employer du fer aussi doux que possible, dans la construction des noyaux d'électro-aimants

(*) Il ne s'agit pas ici d'un *retard dans le temps*; quand on dit que l'induction retarde sur le champ, cela ne signifie pas que, le champ étant établi, l'induction met un certain nombre de secondes pour parvenir à sa valeur finale.

Si le retard dans le temps existe (ce qui est probable, aucun phénomène n'étant instantané), il est extrêmement faible; quelle que soit d'ailleurs sa valeur, c'est un phénomène tout à fait différent de l'hystérésis.

326. *Construction des électro-aimants.* — Lorsqu'on se propose d'employer un électro-aimant à attirer une pièce de fer doux, il y a avantage à courber en forme de fer à cheval la barre qui doit acquérir l'aimantation. On place les deux branches du fer à cheval dans deux bobines A, B (*fig.* 310), sur lesquelles s'enroule un même fil de cuivre, couvert de soie. Les actions des deux bobines devant concorder pour développer des pôles de noms contraires aux deux extrémités A et B, les sens de l'enroulement du fil doivent être inverses sur les deux bobines (*fig.* 311). —

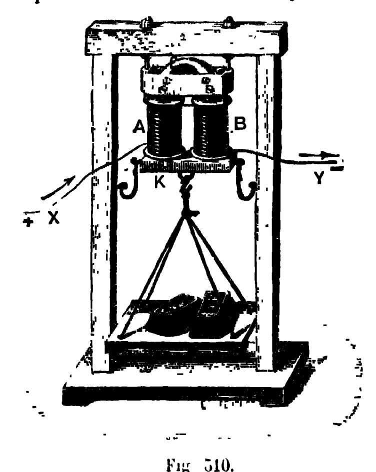


Fig 310.

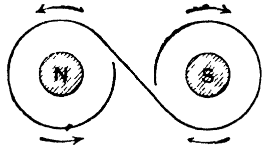


Fig. 311

L'attraction exercée sur la barre de fer doux K, qu'on appelle l'*armature* de l'électro-aimant, doit cesser dès que le courant est interrompu dans le fil (*).

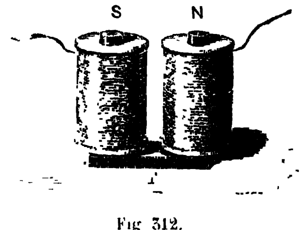


Fig 312.

Au lieu de courber une barre en fer à cheval, on préfère généralement réunir, par une traverse de fer doux T appelée *culasse* (*fig.* 312), deux barreaux N et S placés parallèlement. — C'est toujours ainsi que sont construits, par exemple, les électro-aimants employés dans la télégraphie électrique : on parvient ainsi plus facilement à obtenir ces trois pièces sans force

(*) Cependant on observe souvent que le contact ne se détache pas au moment même où le courant est interrompu; on peut parfois lui faire porter encore le quart ou le tiers de la charge qu'il supportait pendant le passage du courant. Cet effet est dû au magnétisme rémanent (318). — On en diminue beaucoup l'intensité en plaçant entre l'électro-aimant et son contact, une plaque de bois ou de carton, ou même une feuille de papier. On arrive au même résultat, en disposant un butoir qui arrête le contact *à une petite distance* de l'électro-aimant ; c'est ce qu'on fait dans les appareils de télégraphie électrique.

coercitive, et l'électro-aimant fonctionne comme s'il ne contenait qu'une seule pièce de fer, courbée en fer à cheval (*).

Le diamètre de la bobine constituée par le fil enroulé sur le noyau, par couches successives, ne doit pas dépasser le double du diametre du noyau. — L'expérience a montré, en effet, que, pour une bobine dont le diamètre dépasserait cette limite, la chaleur créée dans les spires des couches profondes, par des courants de grande intensité, ne pourrait que difficilement se perdre dans l'atmosphère : dans certains cas, le fil pourrait s'échauffer au point de carboniser la matière isolante qui le recouvre.

Les électro-aimants sont utilisés pour porter leur armature, à laquelle on peut appliquer des forces ou des poids, ou bien pour produire entre leurs pôles des champs magnétiques intenses ; enfin, dans beaucoup de cas, ils sont destinés à produire le mouvement de l'armature, par l'attraction qu'ils exercent sur elle.

327. ***Force portante d'un électro-aimant.*** Si un pôle d'électro-aimant est appliqué exactement contre une armature bien plane, en fer doux, le calcul montre que l'*attraction par centimètre carré* est donnée par la formule

$$F = \frac{\mathcal{B}^2}{8\pi} \text{ dynes, ou } F = \frac{\mathcal{B}^2}{8\pi . 981} \text{ grammes,}$$

puisque le poids du gramme vaut 981 dynes.

En pratique, on ne dépasse pas une induction de 16 000 gauss ; et la force portante est alors d'environ 10 kilogrammes par cm².

328. ***Construction des aimants permanents Procédés d aimantation.*** — Le seul métal employé pour la fabrication des aimants permanents est l'acier trempé, contenant de 0,8 à 1,5 pour 100 de carbone ; pour aimanter un barreau d'acier trempé, on le soumet a l influence du champ magnétique d'un courant. Si l'aimant a la forme d'un barreau rectiligne, on enroule sur son milieu une vingtaine de tours d'un gros fil de cuivre (*fig.* 313), puis on établit un courant intense. On fait ensuite glisser le fil de A en N, puis en S, puis de nouveau en N, et ainsi de suite ; on ramène finalement la bobine en A, et on interrompt le courant.

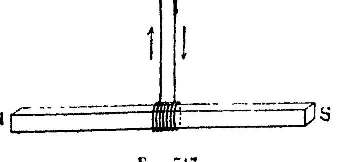


Fig. 313.

(*) Après avoir choisi du fer aussi pur que possible, et avoir donné aux barreaux la forme qu'ils doivent prendre, on les recuit à plusieurs reprises, et on achève de les travailler, non pas au marteau, mais à la lime : on fait ainsi disparaître sensiblement la force coercitive que l'écrouissage ne manque jamais de communiquer, même au fer le mieux préparé.

Pour construire un aimant en fer à cheval, on enroule le fil une vingtaine de fois, en décrivant des 8 autour des deux branches (*fig.* 314); la double bobine étant en NS, on établit le courant et on la fait glisser jusqu'en A; on revient en NS, et ainsi de suite; finalement, on ramène la bobine en NS, et on coupe le courant.

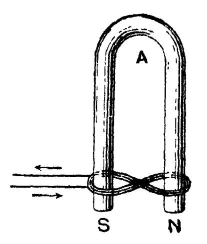
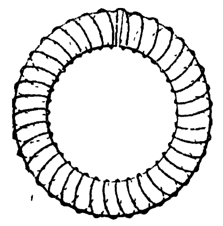


Fig 314.

On peut encore frotter les barreaux à aimanter sur l'un des pôles d'un électro-aimant puissant; mais l'aimantation ainsi obtenue n'est pas toujours régulière.

329. ***Conservation des aimants permanents.*** — Envisageons un anneau fermé en fer doux; en soumettant cet anneau à l'influence d'une bobine roulée sur sa surface, et parcourue par un courant, on en fait un aimant sans pôles; le flux d'induction reste enfermé dans le fer, il n'en sort point dans l'air. L'effet extérieur est nul; c'est pourtant un aimant, car, si on le coupe en A (*fig.* 315), il apparaît deux pôles sur les surfaces en regard, et, dans l'entrefer produit, on a un champ magnétique très intense. On dit que cet aimant, annulaire avant la section, constitue un circuit magnétique fermé. L'expérience montre que l'aimantation d'un tel aimant se conserve intégralement et indéfiniment.


Fig. 315.

Il n'en est pas de même pour les barreaux aimantés en acier; leur intensité d'aimantation diminue peu à peu avec le temps. Pour parer à cet inconvénient et conserver autant que possible leur magnétisme, on a été conduit à les disposer de façon à en faire des sortes d'aimants sans pôles. A cet effet, on les accouple par deux dans une même boîte, parallèlement entre eux, mais en plaçant les pôles de noms contraires en regard (*fig.* 316). On interpose entre eux des cales de bois, pour s'opposer à leur rapprochement, et l'on applique en travers, contre leurs extrémités, des armatures en fer doux *ns*, *sn*. — Les deux barreaux agissent alors simultanément, pour aimanter par influence les deux contacts; dans ces conditions, la majeure partie des lignes de force se ferment *dans l'intérieur même du système*, en passant de S à N *à travers le fer doux*; l'ensemble

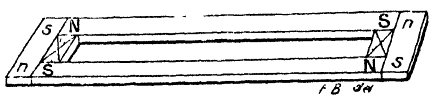


Fig. 316.

des deux barreaux et de leurs armatures constitue alors un circuit magnétique à peu près fermé (il le serait exactement si les surfaces de fer en contact étaient ajustées d'une manière assez parfaite pour que leur distance fût rigoureusement nulle en tous les points de la surface de contact).

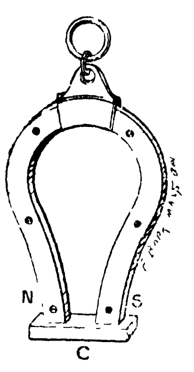


Fig 317.

De même, pour les aimants qui ont la forme de fer à cheval (*fig.* 317), on conserve l'aimantation en appliquant, sur les extrémités des deux branches, une armature en fer doux C, qui s'aimante sous l'influence des deux pôles N et S et forme encore avec l'aimant un circuit magnétique à peu près fermé.

330. ***Corps magnétiques et corps diamagnétiques.*** — Le fer, l'acier et la fonte ne sont pas les seules substances sensibles au champ magnétique ; le nickel et le cobalt sont également magnétiques, mais moins que le fer L'induction qui correspond à la saturation est d'environ 15000 gauss pour le cobalt, et 6000 seulement pour le nickel. — Les composés du fer, oxydes et sels, sont encore magnétiques, mais moins que le nickel. — En employant des champs magnétiques très intenses, on reconnait d'ailleurs qu'aucune substance n'est insensible aux actions magnétiques; tous les corps présentent une perméabilité propre, très voisine de l'unité, mais que l'on a pu néanmoins mesurer.

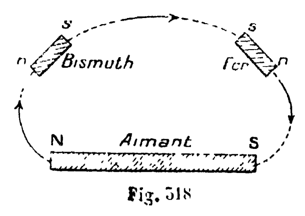


Fig. 318

Un fait remarquable, c'est que, pour certaines substances, les sels de fer, l'oxygène, l'azote, etc., le coefficient de perméabilité μ est supérieur à l'unité, tandis que pour les autres, le bismuth, l'antimoine, le zinc, le cuivre, l'argent, l'or, l'eau, l'hydrogène, etc..., μ est plus petit que l'unité. — Il résulte de là que, pour ces derniers corps, l'induction $\mathcal{B}$ sera inférieure au champ magnétisant $\mathcal{H}$; le champ intérieur sera plus petit que le champ extérieur; les lignes de force du champ, au lieu de se resserrer pour passer en plus grand nombre dans le corps, s'en écarteront au contraire; ces substances sont moins perméables que l'air, on les appelle des *corps diamagnétiques.* Soumis, *dans l'air*, à l'influence d'un champ magnétique, ces corps s'aimantent en sens inverse des corps magnétiques, un pôle nord apparaissant dans la région par laquelle pénètrent les lignes de force du champ (*fig.* 318).

331 ***Influence de la température sur l'aimantation.*** — Pour les

métaux très magnétiques, le fer et ses dérivés, fonte, acier, le nickel et le cobalt, la température a une influence notable sur l'aimantation. Si l'on élève progressivement la température d'un morceau de fer doux, en le maintenant dans un champ d'intensité constante, on constate que la perméabilité correspondant à ce champ diminue lentement jusque vers 750°; puis, vers 785°, elle tombe brusquement à une valeur à peine différente de l'unité; à partir de cette température, qui porte le nom de *température critique*, le fer et l'acier ne sont pas plus magnétiques qu'un corps quelconque. Par suite, si l'on porte au rouge cerise (800°) un barreau d'acier aimanté, et qu'on le refroidisse, soit brusquement par la trempe, soit lentement, il aura perdu toute son aimantation; c'est un des moyens que l'on peut employer pour désaimanter un barreau d'acier.

Pour le nickel, la température à laquelle ses propriétés magnétiques disparaissent est d'environ 340°; pour le cobalt, elle est supérieure à la température critique du fer.

CHAPITRE VI

INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Force électromotrice d'induction. — Courants induits.

332. ***Production des courants induits.*** — Le contact de deux corps différents n'est pas la seule cause capable de déterminer l'apparition d'une force électromotrice (248), et par suite la production d'un courant électrique.

A la suite des travaux d'Ampère sur l'électromagnétisme, Faraday, par des expériences mémorables exécutées en 1831, montra que, si l'on déplace un circuit fermé dans un champ magnétique, ce circuit est le siège d'une force électromotrice, qu'il a appelée *force électromotrice d'induction*, et, par suite, il est parcouru par un courant appelé *courant induit*. — L'expérience suivante met en évidence la production d'un courant induit. Une bobine BB' portant un grand nombre de tours de fil est reliée à un galvanomètre G (*fig.* 319); elle est placée horizontalement sur la table; si on la retourne brusquement face pour face, la déviation du galvanomètre indique qu'un courant passe dans la bobine au moment du déplacement. Si l'on ramène brusquement la bobine à sa position primitive, la déviation du galvanomètre indique que le circuit est parcouru par un courant dont le sens est inverse du précédent. Le *déplacement d'un circuit dans le champ magnétique terrestre* détermine donc dans ce circuit la production d'un courant induit.

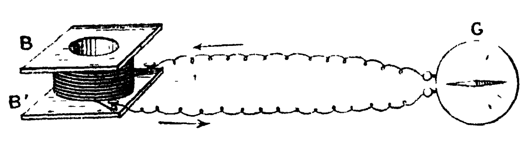


Fig. 319.

Il suffit d'ailleurs que le déplacement du circuit par rapport au champ soit un *déplacement relatif*; si, en effet, la bobine étant

laissée à plat sur la table, on en approche le pôle nord d'un aimant (*fig.* 320), la déviation du galvanomètre montre encore l'existence d'un courant induit dans la bobine; l'expérience montre, de plus, que le courant induit commence avec le déplacement et cesse avec lui, car, si l'on prend la bobine d'une main et l'aimant de l'autre, tout déplacement, soit de l'aimant, soit de la bobine, se traduit immédiatement par une déviation du galvanomètre, déviation qui cesse aussitôt que cesse le mouvement.

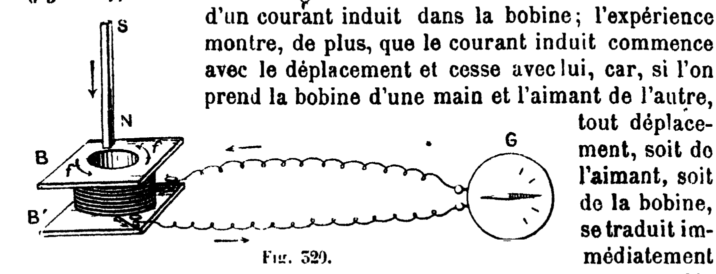


Fig. 320.

Dans ces diverses expériences, on constate, en somme, le fait suivant : une bobine B, en équilibre électrique, se trouve d'abord dans un champ magnétique fixe; on trouble l'état magnétique dans l'espace qu'occupe le fil de cuivre, et, à cette perturbation magnétique répond, comme une sorte d'écho, une perturbation électrique dans la bobine. — D'ailleurs, ce qui a varié dans l'état magnétique du circuit, c'est le flux de force magnétique qu'il embrasse; on peut donc penser que, si le déplacement du circuit B ne faisait pas varier le flux magnétique qui le traverse, aucun courant ne se produirait dans le circuit. L'expérience vérifie pleinement cette prévision. Si, en effet, on fait glisser B horizontalement sur la table, dans le champ magnétique terrestre uniforme, le flux magnétique à travers chacune des spires reste constant et le galvanomètre n'indique alors aucun courant. Il en serait de même si l'on transportait la bobine parallèlement à elle-même, d'un mouvement de translation dans le champ magnétique terrestre, un pareil mouvement n'altérant pas la valeur du flux qui traverse la bobine. — De même encore, si l'on fixe un aimant à la bobine et qu'on déplace tout d'une pièce le système ainsi obtenu, on n'observe pas trace de courant induit dans la bobine.

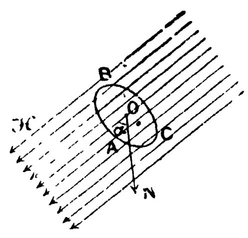


Fig. 321.

333. ***Loi fondamentale de l'induction. — Loi de Lenz.*** — Considérons un champ magnétique créé, soit par la Terre, soit par des aimants, soit par des courants; plaçons, dans ce champ, un circuit métallique fermé ABC (*fig.* 321). Un certain flux magnétique traverse la surface limitée par le contour ABC. Si le contour est plan et d'aire S cm^2, et que le champ sup-

posé uniforme ait pour intensité $\mathcal{H}$ gauss, le flux magnétique à travers la surface ABC, supposée normale au champ, est $S\mathcal{H}$, par définition ; si la normale ON au plan ABC fait un angle α avec la direction du champ, le flux à travers S n'est plus que $S\mathcal{H}\cos\alpha$ (284). — Ce flux est donc exprimé par un produit de trois facteurs ; si l'un d'eux varie, le flux éprouvera une variation correspondante, qui ne pourra provenir que des trois causes suivantes : 1° variation de S, provenant d'une déformation du circuit ; 2° variation de l'intensité $\mathcal{H}$ du champ à l'endroit où se trouve le circuit ; cette variation peut être due, soit au déplacement relatif du circuit par rapport au champ, soit à des variations de l'intensité du courant qui produit le champ ; 3° variation de l'angle α, due au déplacement du circuit par rapport à la direction des lignes de force du champ.

Cela posé, voici l'énoncé de la loi fondamentale de l'induction :

Si, pour une raison quelconque, le flux magnétique qui traverse la surface limitée par un circuit vient à éprouver une variation, le circuit lui-même est le siège d'une force électromotrice d'induction, et, par suite, il est parcouru par un courant induit temporaire, dont la durée est égale à celle de la variation du flux.

Le sens de ce courant est tel que le flux magnétique qu'il envoie à travers son propre circuit tend à compenser la variation de flux qui lui a donné naissance.

Cette dernière partie, qui règle le sens du courant induit, et qui est connue sous le nom de *loi de Lenz* (*), peut encore s'énoncer de la manière suivante, dans le cas où la variation de flux est produite par un déplacement : *Le sens du courant induit est tel que, par ses actions électromagnétiques, il tend à s'opposer au déplacement qui le produit.*

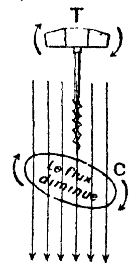


Fig. 322.

La détermination du sens du courant induit peut se faire facilement au moyen de diverses règles pratiques ; voici les principales :

1° *Règle du tire-bouchon de Maxwell.* — On fait tourner un tire-bouchon T de manière qu'il s'enfonce dans le sens des lignes de force du champ ; si le flux à travers le circuit C diminue, le courant induit a le sens de la rotation du tire-bouchon (*fig.* 322) ; si le flux augmente, le courant induit tourne en sens inverse du tire-bouchon (*fig.* 323). On voit immédiatement que cette règle est bien d'accord avec la loi de Lenz ; en effet, le courant

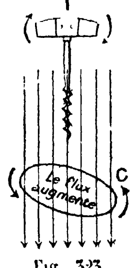


Fig. 323.

(*) Lenz (1804-1865), physicien russe, n'est plus guère connu que par cette loi, à laquelle son nom est resté attaché.

induit a un sens tel, que son propre flux magnétique, celui qu'il produit lui-même à travers sa surface, est de même sens que le flux primitif, si celui-ci diminue, et de sens contraire, si le flux primitif croît; le courant induit tend donc bien à empêcher la variation de ce flux, comme le veut la loi de Lenz.

2° *Règle des trois doigts* (*main gauche*). — Dans le cas particulier très important, où la force électromotrice d'induction est due au déplacement d'un circuit dans un champ magnétique fixe (cas des dynamos), la *règle des trois doigts* (308, *Note*), appliquée avec *la main gauche*, donne le sens du courant induit : l'*index* étant dirigé *dans le sens des lignes de force*, et le *médius* dans *le sens du déplacement*, le *pouce* indique le *sens du courant induit*.

En reprenant les expériences précédentes, et en utilisant comme inducteurs les divers champs magnétiques que nous connaissons (terre, aimants, courants), nous allons pouvoir vérifier surabondamment la loi fondamentale de l'induction.

334. ***Induction par le champ magnétique terrestre.*** — La bobine B étant placée *horizontalement* (*fig.* 319), on la retourne face pour face. Représentons en AB (*fig.* 324) un des tours de fil de la bobine placée horizontalement; soit S sa surface, F l'intensité du champ magnétique terrestre et I l'inclinaison magnétique (2[illegible]); si l'on suppose, pour plus de simplicité, que le circuit AB tourne autour de l'horizontale OX du méridien magnétique, on voit que le flux, qui a d'abord pour valeur SF sin I, diminue, puis devient nul quand AB est vertical, change de signe, puisqu'il pénètre par l'autre face du circuit, et, après retournement complet (rotation de 180°), a pour valeur —SF sin I; ce flux a donc varié de 2SF sin I. Le flux magnétique, qui entrait par la face de AB d'abord dirigée vers le haut, ayant constamment diminué, le sens du courant induit dans AB est celui qui est indiqué par les flèches *f*, *f*, comme cela résulte de l'application de la règle du tire-bouchon. On peut remarquer que la face considérée du circuit AB a été une face sud pendant la rotation (*).

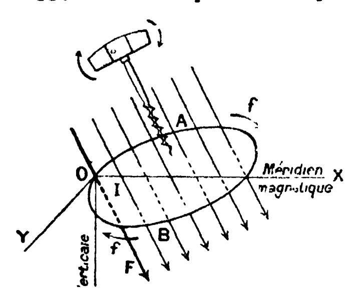


Fig. 324.

(*) On emploie toujours des bobines pour faire les expériences d'induction; c'est un moyen particulièrement commode de réaliser un circuit à très grande surface, et de produire, par suite, une variation totale considérable de flux magnétique à travers la surface embrassée par ce circuit; chaque spire est le siège d'une certaine force électromotrice d'induction, et pour la bobine entière la force électromotrice totale est la somme de ces forces électromotrices partielles.

335. ***Induction produite par un aimant.*** — La bobine B étant reliée au galvanomètre, on en approche le pôle nord N d'un aimant (*fig.* 325); le flux qui entre par la face B croît, car le champ qu'on approche augmente d'intensité; donc, le courant tournera dans B comme l'indiquent les flèches *f*. On peut dire encore que, si l'on approche le pôle N de la face B, le courant induit est tel, que cette face devient un pôle nord, qui exerce une force répulsive sur le pôle nord de l'aimant qu'on force à s'approcher de la bobine. — Si, au lieu du pôle nord, on approche le pôle sud, le courant induit est de sens contraire; il serait également de sens contraire si l'on éloignait le pôle nord (*).

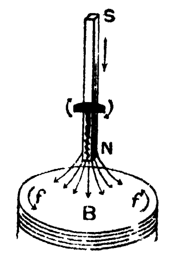


Fig. 325.

336. ***Induction produite par le champ magnétique d'un courant.*** — Si l'on substitue à l'aimant NS un solénoïde N_1S_1 (*fig.* 326), les résultats sont absolument les mêmes, le pôle nord N_1 du solénoïde produisant les mêmes effets que le pôle nord de l'aimant. — La variation du flux est évidemment beaucoup plus grande, si le solénoïde contient un noyau de fer doux.

Fig. 326.

En particulier, pour faire varier le plus possible le flux magnétique à travers la bobine B, il faudra introduire le solénoïde dans la cavité de cette bobine, puis établir brusquement le courant dans N_1S_1; le flux passera brusquement de la valeur zéro à la valeur

$$\Phi = \frac{4\pi n_1 i s}{10} \text{ maxwells (314),}$$

le courant induit produira dans la bobine B un champ magnétique dirigé en sens inverse de celui que le courant inducteur crée dans le solénoïde. La figure 327 représente l'ensemble des deux bobines, dans le cas de la fermeture du courant dans le solénoïde inducteur; la figure 328 représente la rupture du courant inducteur.

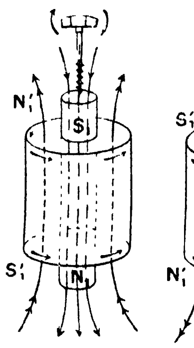


Fig. 327.

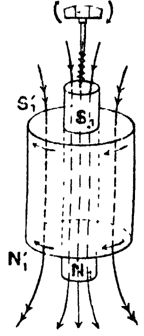


Fig. 328.

337. ***Self-induction.*** — Considérons un circuit ABC (*fig.* 329) parcouru par le courant d'une pile,

(*) Rappelons ici que l'amortissement des oscillations du galvanomètre (301 et 312) est une application directe de la loi de Lenz.

et supposons que l'intensité du courant diminue (par exemple, par l'augmentation de la résistance du circuit) : le flux magnétique que le courant envoie à travers le contour ABC va diminuer ; donc, dans le circuit ABC, il va apparaître une force électromotrice d'induction ; comme le flux diminue, le courant qu'elle produirait, si elle existait, seule, tendrait à empêcher le flux de diminuer, c'est-à-dire qu'il serait de même sens que le courant principal. — En particulier, on pourra annuler le flux magnétique qui traverse le circuit ABC, en interrompant le courant ; pendant que le flux passera de sa valeur actuelle à zéro, une force électromotrice d'induction apparaîtra dans le circuit, et aura un sens tel qu'elle tendra à prolonger l'existence du flux, et par suite celle du courant primitif.

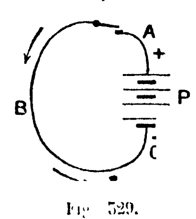


Fig. 329.

Si, au contraire, on ferme le circuit d'abord ouvert, le flux magnétique à travers ABC, d'abord nul, se met à croître ; pendant qu'il augmente, le circuit est le siège d'une force électromotrice inverse dont l'effet est de retarder le moment où le régime permanent du courant est établi ; si le circuit ABC contient un électro-aimant puissant, ce retard peut atteindre plusieurs secondes.

La force électromotrice d'induction ainsi créée dans un circuit par les variations d'intensité du courant principal qui se propage dans ce même circuit a reçu le nom de *force électromotrice de self-induction* ; le courant qu'elle tend à produire et que l'on peut envisager comme se superposant au courant principal porte le nom d'*extra-courant*.

Les effets de ces extra-courants sont d'autant plus intenses que la variation du flux est elle-même plus grande ; pour les observer, il sera donc commode de constituer une partie du circuit de telle sorte que la variation de flux soit considérable, par exemple d'y intercaler une bobine avec un noyau de fer doux (*). Les expériences suivantes montrent bien les effets de ces extra-courants.

1° *Étincelle de rupture*. — Si l'on interrompt le circuit d'une pile contenant un électro-aimant, on voit une étincelle très vive jaillir au point de rupture ; or ce n'est pas la force électromotrice de la pile qui a pu la produire, elle est beaucoup trop faible (**) ; l'étincelle est due à la force électromotrice de self-induction.

2° Le circuit d'une pile est bifurqué entre A et B (*fig.* 330) ; dans une des branches, se trouve intercalé un électro E un peu puissant et, dans l'autre branche, on a placé une lampe à incandescence servant de galvanoscope, et dont la résistance est à peu près égale à celle du

(*) Un électro-aimant un peu puissant convient très bien.

(**) Pour avoir une étincelle d'un millimètre, dans l'air, il faut une force électromotrice de plusieurs milliers de volts (198).

fil de l'électro. En réglant la résistance du circuit général, on fait en sorte que la lampe L éclaire à peine; cela fait, on ouvre le circuit en C; à ce moment même, la lampe brille d'un vif éclat dû à la production subite de l'extra-courant de rupture qui circule comme l'indiquent les flèches en pointillé. — Si, maintenant, on ferme

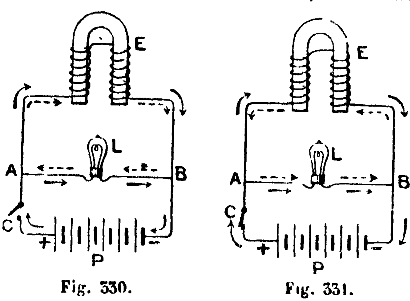


Fig. 330. Fig. 331.

l'interrupteur, on voit de nouveau la lampe devenir très brillante. l'extra-courant de fermeture, dont le sens est figuré par les flèches en pointillé de la figure 331, se superpose au courant principal, pendant la période d'établissement; c'est ce qui détermine l'éclat temporaire de la lampe (*).

338. ***Courants de Foucault.*** — Dans les expériences précédentes, nous avons supposé que les conducteurs induits étaient des conducteurs linéaires. Les phénomènes d'induction se produisent suivant les mêmes lois dans des masses conductrices de forme quelconque : ils donnent lieu alors à des courants fermés à l'intérieur de la masse. La loi de Lenz leur est applicable ; ils tendent donc toujours à s'opposer au déplacement ou à la variation de flux qui leur a donné naissance : l'énergie de ces courants apparaît alors tout entière à l'état de chaleur de Joule. L'expérience suivante, due à Foucault, permet de le montrer.

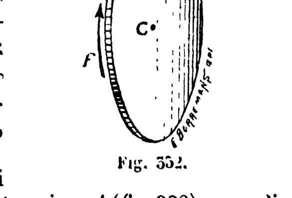


Fig. 332.

Entre les pièces de fer doux *n* et *s* qui forment les pièces polaires d'un gros électro-aimant (*fig.* 332), passe librement un disque de cuivre C que l'on peut faire tourner autour de son

(*) On pourrait simplement prendre comme galvanoscope, au lieu d'une lampe, le corps de l'opérateur; il suffit de mettre les mains en contact avec les bornes de l'électro pour ressentir une secousse à chaque fermeture, et surtout à chaque rupture du courant. Il est bon de ne pas employer un électro-aimant de trop grande puissance, la secousse nerveuse pouvant alors devenir désagréable et même dangereuse.

axe, au moyen d'un système de roues dentées et d'une manivelle qui ne sont pas représentées sur la figure (*). Tant que l'électro n'est pas aimanté, il suffit d'un effort très faible pour imprimer au disque un mouvement de rotation rapide. — Mais si, au moment où le disque est animé d'une grande vitesse, on vient à faire passer dans le fil de l'électro-aimant un courant de quelques ampères, de manière à donner naissance à un champ magnétique intense, on constate que le disque est brusquement arrêté : cet arrêt est dû à la résistance développée par les courants induits qui se sont produits dans le disque lui-même ; c'est là une excellente vérification expérimentale de la loi de Lenz. — Si l'on veut continuer à faire tourner le disque, on ne parvient à lui imprimer qu'un mouvement de rotation beaucoup plus lent, même avec un effort considérable. Le travail mécanique dépensé se transforme alors en énergie électrique, par la production de courants induits circulant dans le disque pendant la rotation. Cette énergie électrique apparaît d'ailleurs sous forme de chaleur (225) : il se produit dans la masse de cuivre une élévation de température que l'on peut constater en y appliquant simplement la main.

Si l'on pratique des traits de scie suivant les rayons du disque (*fig.* 333), ces effets sont sensiblement annulés. C'est par un procédé analogue que l'on évite la production de ces courants dans les pièces de fer doux qui sont soumises, dans les dynamos, à des aimantations de sens contraires, se succédant assez rapidement ; au lieu de noyaux pleins, on emploie des faisceaux de fil de fer, ou des piles de plaques de tôle séparées par une couche de vernis.

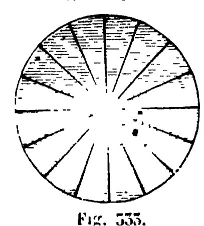


Fig. 333.

339. ***Expression de la force électromotrice d'induction.*** — Nous avons vu (311) que, si l'on fait tourner une roue de Barlow dans un champ uniforme, au moyen du courant d'une pile, la portion mobile du circuit est le siège d'une force électromotrice inverse, qui a pour valeur

$$e = \frac{\Phi_1}{10^8} = \frac{\pi r^2 n \mathcal{H}}{10^8} \text{ volts} \qquad (1)$$

Φ_1 étant le flux magnétique coupé par seconde ; le courant qui se propage dans le circuit a donc pour intensité

$$I = \frac{E - e}{R} \text{ ampères}$$

(*) Pour communiquer au disque une grande vitesse de rotation, on pourrait simplement le lancer, à la façon d'une toupie, au moyen d'un cordon enroulé sur l'axe.

où E est la force électromotrice de la pile, et R la résistance totale du circuit. — Supposons que l'on diminue la valeur de la force électromotrice E, sans changer la résistance (en substituant progressivement aux éléments de pile des résistances équivalentes), et que *l'on maintienne constante la vitesse de rotation*; la force électromotrice inverse restera fixe, puisqu'elle ne dépend que du nombre de tours par seconde et de l'intensité du champ. L'intensité du courant diminuera, puis s'annulera pour une certaine valeur de E; si E diminue encore, le courant changera de sens, et lorsque E sera devenue égale à zéro, il n'y aura plus dans le circuit que la force électromotrice inverse *e*. La découverte de Faraday consiste précisément en ce que *cette force électromotrice e persiste, même si le circuit est un simple conducteur ne contenant aucune autre force électromotrice.* En d'autres termes, le mouvement *uniforme* d'un conducteur, dans un champ magnétique *uniforme*, fait apparaître dans ce conducteur une force électromotrice inverse (force électromotrice d'induction) qui, évaluée en volts, est égale au quotient par 10^8, du flux coupé par seconde; si le conducteur fait partie d'un circuit fermé, de résistance R, cette force électromotrice produira un courant dont l'intensité sera réglée par la loi d'Ohm

$$I = \frac{e}{R} = \frac{\Phi_1}{10^8 . R},$$

et la quantité d'électricité, évaluée en coulombs, mise en jeu pendant un temps T, sera

$$M = IT = \frac{\Phi_1 T}{10^8 . R} = \frac{\Phi}{10^8 . R} \qquad (2)$$

où Φ est le flux coupé par le conducteur mobile pendant le temps T.

Il résulte immédiatement de là une conséquence importante : le flux coupé par seconde, dans un champ magnétique donné, étant d'autant plus grand que la vitesse du conducteur mobile est plus grande, on voit sur la formule (1) que *la force électromotrice d'induction est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à la vitesse du déplacement.*

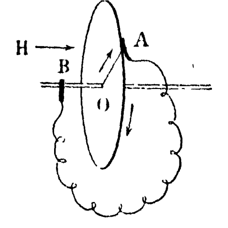


Fig. 331.

Le courant produit est de sens contraire au courant primitif qui, par son action électromagnétique, communiquait à la roue précisément le mouvement qu'elle a maintenant; il tendra donc à s'opposer au mouvement : *c'est la loi de Lenz.*

Si le conducteur ne fait pas partie d'un circuit fermé, il s'établit, entre ses deux extrémités, une différence de potentiel qui fait équilibre à la force électromotrice d'induction.

Application. — Calculer la force électromotrice d'induction d'une roue de Barlow (fig. 334) *de* 10 *centimètres de rayon, tournant autour d'un axe horizontal situé dans le plan du méridien magnétique, avec une vitesse de* 20 *tours par seconde?*

L'intensité du champ magnétique inducteur est ici la composante horizontale du champ terrestre, qui a pour valeur 0,2 gauss; le flux balayé par seconde, par le conducteur mobile, sera donc

$$\Phi_1 = \pi . 10^2 . 20 . 0{,}2 = 1256,$$

et la force électromotrice

$$e = \frac{1256}{10^8} = 0{,}00001256 \text{ volt.}$$

En intercalant un galvanomètre sur le circuit extérieur AB, et en faisant varier la vitesse de rotation du disque, on vérifie sans peine que l'intensité du courant induit, et par suite la force électromotrice d'induction, est proportionnelle au nombre de tours que le disque fait par seconde.

340. ***Courant de décharge.*** — La généralisation de la formule $e = \frac{\Phi_1}{10^8}$, pour le cas où la variation du flux ne serait plus uniforme, n'entre pas dans le cadre que nous nous sommes tracé; toutefois, nous pouvons, dans un cas particulier, et sans passer par la formule générale, arriver à un résultat important.

Considérons le cas réalisé dans les différentes expériences qui nous ont servi à établir l'existence des courants d'induction (334, 335, 336). On a affaire à une véritable décharge: l'intensité du courant induit part de zéro, passe par un certain maximum, diminue et revient à zéro. Soit Φ_1 et Φ_2 les valeurs du flux magnétique à travers le circuit, dans son état initial et dans son état final; le courant induit a duré un temps T, pendant lequel la variation du flux a été $\Phi_2 - \Phi_1$; cette variation a suivi une loi plus ou moins compliquée. Partageons le temps T en n intervalles égaux à t, et assez petits pour que l'on puisse considérer la variation du flux comme uniforme pendant chacun d'eux; appelons φ_1, φ_2... φ_n les variations du flux à travers le circuit pendant les intervalles successifs de temps t, et appliquons à chacun de ces intervalles la formule (2) du paragraphe précédent; les quantités m_1, m_2.... m_n d'électricité mises en jeu pendant ces divers intervalles seront :

$$m_1 = \frac{\varphi_1}{10^8 . R}, \quad m_2 = \frac{\varphi_2}{10^8 . R} \cdots \quad m_n = \frac{\varphi_n}{10^8 . R};$$

la quantité totale d'électricité mise en jeu sera la somme de toutes ces quantités,

$$M = \frac{1}{10^8.R}(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \cdots + \varphi_n);$$

la quantité entre parenthèses n'est autre chose que la variation totale du flux, c'est-à-dire $\Phi_2 - \Phi_1$; donc on pourra écrire

$$M = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{10^8.R} \text{ coulombs (*)}.$$

Cette formule est très importante dans les applications; tirons-en quelques conséquences.

1° *Intensité moyenne d'un courant de décharge.* — La quantité d'électricité mise en jeu ne dépend que de l'état initial et de l'état final du système, elle est déterminée, pour une modification donnée; si cette modification se fait très rapidement, la quantité d'électricité correspondante est transportée dans un temps très court par le courant induit, dont l'intensité sera, par suite, d'autant plus grande, que le passage de l'état initial à l'état final aura été plus rapide; c'est ce qu'on peut vérifier sans peine dans l'induction d'un aimant sur une bobine (335).

2° *Calculer la quantité d'électricité induite par le retournement face pour face d'une bobine placée horizontalement dans le champ terrestre?*

Si S représente la somme des surfaces comprises dans les tours de fil de la bobine, R la résistance du circuit et Z la composante verticale du champ magnétique terrestre, on aura (334)

$$M = \frac{2SZ}{10^8.R}.$$

Supposons une bobine portant 1000 tours de fil, et dont le rayon moyen est de 10 centimètres: la surface totale sera $\pi . 10^2 . 1000$, ou $3,14 . 10^5$ centimètres carrés; si la résistance totale est de 20 ohms, on aura, en admettant que $Z = 0,42$ gauss,

$$M = \frac{2 \times 0,42 \times 3,14 \times 10^5}{10^8 \times 20} = 0,008132 \text{ coulomb}.$$

Si le retournement est assez rapide, on pourra mesurer cette quantité d'électricité au moyen du *galvanomètre balistique* (303). Il résulte immédiatement de là une méthode pour mesurer un flux de force magnétique, ou, ce qui revient au même, un flux d'induction.

(*) Si $\Phi_1 = \Phi_2$, $M = 0$; cela ne signifie pas forcément qu'il n'y a pas eu de courants induits, mais simplement que, s'il y en a eu, ils ont transporté en sens contraire, et successivement, des quantités égales d'électricité.

341. ***Mesure du flux d'induction totale d'un aimant.*** — On enroulera, vers le milieu du barreau, quelques tours de fil, joignant exactement; et on reliera cette bobine à un galvanomètre balistique; on éloignera ensuite brusquement l'aimant, assez loin pour que le flux qu'il envoie alors dans la petite bobine soit négligeable. De la déviation observée, on déduira (303) la quantité d'électricité mise en jeu par le courant induit et, par suite, la valeur du flux d'induction qui traverse la section médiane de l'aimant.

On conçoit sans peine comment cette méthode permet de mesurer un flux magnétique quelconque. — Elle peut également servir pour déterminer l'intensité d'un champ, en mesurant la variation de flux à travers une bobine dont l'axe est parallèle au champ, lorsqu'on la retourne face pour face; l'intensité du champ est donnée par l'expression

$$\mathcal{H} = \frac{10^8 . R . M}{2S}.$$

Remarque. — C'est en employant ce procédé pour un champ magnétique connu (champ terrestre, ou champ intérieur d'une bobine longue) que l'on gradue habituellement le galvanomètre balistique.

CHAPITRE VII

APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ

I. — Applications des électro-aimants. Sonneries électriques. — Télégraphie électrique.

342. ***Sonneries électriques.*** — Les sonneries électriques fournissent un exemple simple des applications des électro-aimants.

Un électro-aimant en fer à cheval est fixé sur une planche verticale (*fig.* 335); en face des extrémités de ses branches, se trouve une pièce de fer doux L, supportée par une lame d'acier élastique fixée en C; cette pièce de fer porte une tige munie d'un marteau M, destiné à frapper sur un timbre fixe T. A l'état de repos, la pièce L, écartée de l'électro-aimant, appuie en *a* contre le ressort *r*, qui communique, par la borne B, avec le fil conducteur venant de l'un des pôles d'une pile. — Le support métallique C communique, comme le montre la figure, avec l'une des extrémités du fil de l'électro-aimant; l'autre extrémité de ce même fil est mise en communication, par la borne A, avec le fil conducteur qui se rend à l'autre pôle de la pile.

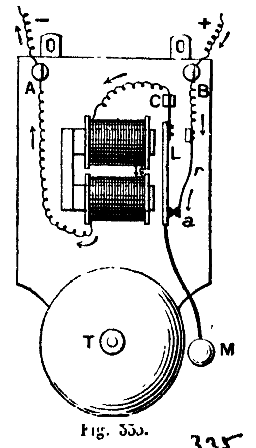


Fig. 335.

Dès que le circuit de la pile est fermé, le courant passe par le ressort *r*, par la palette L et par le fil de l'électro-aimant. Mais, le passage même du courant ayant pour effet d'aimanter l'électro, la palette L est attirée et s'éloigne du ressort *r* : le circuit est alors interrompu, et l'électro-aimant cesse d'attirer la palette. Dès lors, la lame élastique qui supporte la palette la ramène au contact du ressort *r* : de nouveau le circuit est fermé; la palette est attirée de nouveau par l'électro-aimant, et ainsi de suite, tant que dure le pas-

sage du courant. Chaque fois que la palette est attirée, le marteau frappe un coup sur le timbre.

Pour faire fonctionner la sonnerie à distance, on ménage une interruption, en l'un des points du circuit, et l'on y place un bouton d'appel (*fig.* 336), sur lequel on appuiera avec le doigt quand on voudra fermer le circuit pour faire entrer la sonnerie en jeu. — Dans la majorité des installations, on emploie, comme pile, des éléments Leclanché.

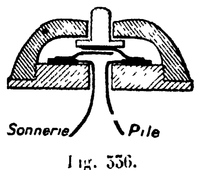


Fig. 336.

343. ***Télégraphe électrique.*** — Les diverses dispositions employées pour la télégraphie électrique sont fondées sur les propriétés des électro-aimants. Les parties essentielles d'un système quelconque de télégraphie électrique sont :

1° Un *électromoteur* (pile ou batterie d'accumulateurs), placé au point d'où la dépêche doit partir;

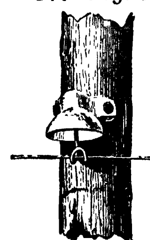
2° Une *ligne télégraphique*, c'est-à-dire un conducteur établissant la communication entre les points qui sont en correspondance;

3° Un appareil *manipulateur*, placé au point de départ de la dépêche, et permettant d'interrompre et de rétablir le courant à volonté;

4° Un appareil *récepteur*, placé au point d'arrivée : il comprend un électro-aimant, qui entre en action chaque fois que le courant lui est transmis; cet électro imprime alors un mouvement à une pièce de fer doux qui lui sert d'armature. — Les mouvements ainsi produits peuvent être observés directement, ou transmis à tels ou tels organes, selon qu'il s'agit de tel ou tel système télégraphique.

On fait le plus souvent usage de piles qui ne sont que des modifications de la pile de Daniell (éléments Callaud), et qui présentent une constance suffisante pendant plusieurs semaines.

344. ***Lignes télégraphiques, aériennes ou souterraines.*** — La communication entre les postes d'une ligne télégraphique s'établit au moyen de fils de cuivre ou de fils de fer *galvanisés*, c'est-à-dire couverts d'une couche de zinc qui les préserve de l'oxydation (*). Ceux de ces fils qui sont placés à ciel ouvert sont soutenus par des poteaux, et reposent sur des crochets métalliques, fixés à des supports de porcelaine isolants (*fig.* 337).


Fig. 337

Dans l'intérieur des grandes villes, à Paris, par exemple, les fils sont souterrains. L'isolant est formé d'une longue bande de papier roulée, autour du fil, en hélice dont les spires ne sont pas serrées contre le fil; on

(*) Ces fils de fer galvanisé ont, en général, 4 mm de diamètre et 12,2 ohms de résistance par kilomètre; le mètre pèse 0,1 kg

groupe ensemble, sous une tresse lâche en coton, un certain nombre de ces fils conducteurs, et le câble ainsi formé est placé dans un tube de plomb d'un diamètre intérieur un peu plus grand que celui du câble. La figure 338 représente un bout de câble téléphonique contenant 7 paires de fils conducteurs. — Ces câbles sont appliqués contre les voûtes des égouts.

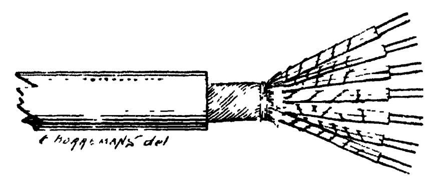
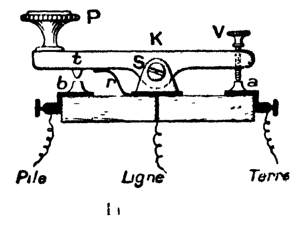


Fig. 338.

Quand le papier est bien sec, il constitue un bon isolant; mais à la longue, l'humidité finirait par pénétrer dans le câble et l'isolement deviendrait défectueux; on restitue au papier son pouvoir isolant primitif en faisant passer pendant quelques minutes un courant d'air sec à travers le câble; cette opération ne présente aucune difficulté en raison des interstices laissés à dessein entre les diverses enveloppes des fils de cuivre.

345. ***Suppression du fil de retour.*** — Du pôle positif de la pile placée à l'une des stations, part un fil qui se rend au récepteur de l'autre station, et qui constitue la ligne télégraphique; dans l'origine, on employait un second fil, pour ramener le courant au pôle négatif de la pile. Depuis longtemps, on a supprimé ce *fil de retour*, et l'on fait communiquer avec le sol, d'une part le pôle négatif de la pile, d'autre part l'extrémité libre du fil de l'électro-aimant du récepteur. L'électricité du pôle positif tombe alors, d'un potentiel égal à la force électromotrice E de la pile, au potentiel zéro du sol : en employant ainsi moitié moins de fil, on obtient, avec la même pile, un courant d'intensité sensiblement double, car la résistance n'est que la moitié environ de ce qu'elle serait avec le fil de retour; l'expérience montre, en effet, qu'une bonne prise de terre n'a qu'une dizaine d'ohms de résistance, quelle que soit la distance des deux stations.

346. ***Télégraphe de Morse.*** — Le système télégraphique de Morse, inventé en Amérique, est l'un des plus employés.



Manipulateur. — Le manipulateur se compose d'un levier métallique K (*fig.* 339), qui est mobile autour d'un axe S communiquant avec la ligne. Lorsqu'on appuie avec la main sur la poignée P, la pointe métallique *t* vient porter sur la pièce métallique *b*, qui communique avec le pôle positif de la pile : tant que cette

pression dure, le courant de la pile passe sur la ligne; dès que la pression cesse, le ressort r relève le levier, et le courant est interrompu. — En faisant varier la durée des contacts, on peut envoyer ainsi sur la ligne une succession de courants, dont on règle à volonté le rythme et la durée.

Récepteur. — Les mouvements du levier du manipulateur sont fidèlement reproduits par un levier AOD (*fig.* 340), qui est la pièce principale du récepteur. — Ce levier est mobile autour d'un axe O : sa branche OA porte une plaque de fer doux, placée au-dessus d'un électro-aimant E, dont le fil communique d'une part avec la ligne, d'autre part avec le sol. Au-dessus de l'extrémité de l'autre bras du levier, passe une bande de papier XY, qui est entraînée d'un mouvement uniforme entre deux cylindres horizontaux b, a, mobiles autour de leurs axes et mis en mouvement par un mécanisme d'horlogerie contenu dans la boîte qui supporte toutes ces pièces. — Tant qu'il n'y a pas de courant transmis au fil de l'électro-aimant, le ressort à boudin r maintient relevé le bras OA du levier. Dès que le courant passe, l'électro-aimant abaisse le bras OA; l'extrémité D du levier soulève alors la bande de papier et vient l'appuyer très légèrement sur une molette m couverte d'encre : cette molette imprime ainsi, sur le papier, un trait dont la longueur dépend de la durée du courant.

Pour limiter l'amplitude des mouvements du levier AOD, on place au-dessus et au-dessous du prolongement de OA deux vis fixes f et g; la première, f, est réglée de manière que la pièce de fer A s'éloigne peu de l'électro-aimant pendant les interruptions du courant; la seconde, g, empêche la pièce A de venir toucher l'électro-aimant, ce qui aurait l'inconvénient de développer dans le fer doux du magnétisme rémanent, et de troubler la marche de l'appareil (326, *Note*).

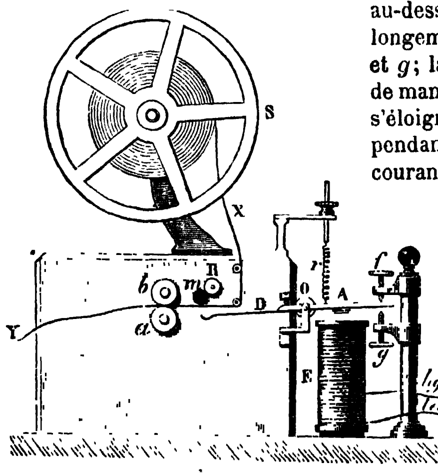


Fig. 340.

On n'emploie que deux traces différentes : le *point* (•), d'une longueur d'à peu près 3/4 de millimètre, qui correspond à un

courant presque instantané, et le *trait* (—), dont la longueur est trois fois celle du point, et qui correspond à un courant d'une durée un peu plus grande. C'est en combinant de diverses façons ces deux

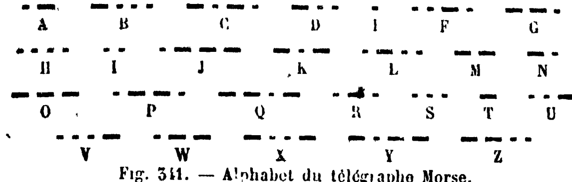


Fig. 341. — Alphabet du télégraphe Morse.

traces, qu'on représente les lettres de l'alphabet, comme l'indique la figure 341. — On laisse, entre les lettres successives qui composent un mot, un intervalle plus grand que celui qui est ménagé entre les signaux formant une même lettre. Ainsi, le nom de l'inventeur Morse s'écrirait comme l'indique la figure 342 :

M O R S E

Fig. 342.

Ce système paraît, au premier abord, exiger une longue expérience: ceux qui l'ont manœuvré pendant quelque temps en acquièrent cependant une telle habitude, qu'il leur suffit d'écouter les mouvements du levier pour comprendre la dépêche *au son*; la lecture de la bande n'est plus ensuite pour eux qu'une vérification (*).

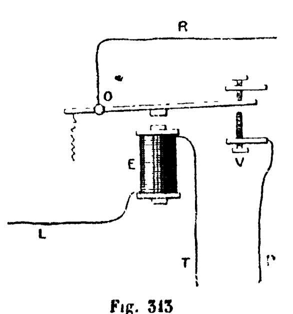


Fig. 343

347. ***Relais télégraphique.*** — Quand la distance entre deux stations est considérable, le courant arrive trop affaibli au récepteur pour pouvoir le faire fonctionner (**). On emploie alors un appareil auxiliaire, qu'on appelle *relais* (*fig.* 343). C'est un électro-aimant E, présentant la disposition ordinaire d'un électro-aimant de récepteur, et mis en communication permanente avec la ligne L

(*) Dans beaucoup d'appareils Morse, en Angleterre, en Amérique, on a même supprimé depuis longtemps le système inscripteur; le récepteur ne comporte plus ni mouvement d'horlogerie ni bande de papier; seuls, l'électro et son armature restent. Les signaux sont définis par le bruit que fait le levier en venant buter contre les vis *f* et *g* (*fig.* 340); ce bruit est renforcé par une sorte de caisse sonore, ou *abat-son*, qui concentre vers l'employé les ondes sonores produites par les chocs de l'armature contre les vis de butée. Les praticiens assurent qu'un employé exercé commet moins d'erreurs en *recevant au son* qu'en lisant la bande imprimée.

(**) Un récepteur Morse ordinaire exige un courant de 25 milliampères, ce qui, à cause des pertes par défaut d'isolement le long de la ligne, nécessiterait un trop

et avec la terre T. Quand un courant émis sur la ligne arrive au relais par le fil L, son électro-aimant abaisse la branche du levier qui est au-dessus de lui, et la fait buter contre la vis V qui communique, par le fil P, avec une *pile locale* : c'est alors le courant de cette pile qui met en jeu le récepteur, en passant par le fil R. Quand le courant d'émission cesse d'agir, un ressort antagoniste ramène le levier à la première position. — Le courant de la pile P transmet donc synchroniquement au récepteur tous les signaux du manipulateur d'émission.

348. ***Appareils accessoires : sonneries, paratonnerres.*** — Chaque poste comprend nécessairement une pile, un manipulateur et un récepteur; il doit être muni, en outre, de divers appareils accessoires, dont les principaux sont une *sonnerie d'appel* et un *paratonnerre*.

La sonnerie d'appel est une sonnerie trembleur, du type de celle qui a été décrite plus haut (342).

Quant au paratonnerre, il a pour but de préserver les appareils, et aussi les employés, des décharges que les courants développés dans la ligne, sous l'influence des orages, pourraient produire à l'intérieur des postes. Il en existe un nombre considérable de modèles; nous nous bornerons à indiquer le principe de l'un d'eux. Le fil de ligne communique avec les appareils du poste par l'intermédiaire d'une plaque de cuivre A (*fig.* 344), munie de dents aigues et d'un fil métallique fin *f*. En regard de A se trouve une plaque métallique B également dentée; l'intervalle qui sépare les pointes des dents est très petit (une petite fraction de millimètre). Si les courants, induits dans la ligne par des nuages orageux, deviennent dangereux, le fil *f* fond et intercepte la communication avant que les appareils aient été détériorés. Les décharges statiques qui pourraient se produire jaillissent entre les pointes des pièces A et B et se perdent dans le sol. — Si l'on est menacé d'un orage un peu violent, il est prudent de renoncer à la correspondance, qui d'ailleurs deviendrait bientôt impossible, au moyen d'une fiche de cuivre, on établit en *a* une communication directe entre A et B, puis on coupe la communication entre A et *f*; les courants induits dans la ligne vont alors directement au sol.

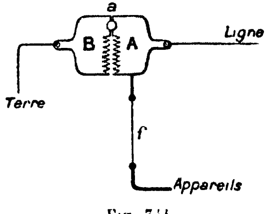


Fig. 344.

349. ***Installation d'un double poste télégraphique.*** — Chacune des deux stations doit pouvoir *transmettre* et *recevoir*; envisageons le cas le plus simple, celui où la ligne commune aboutit *seule* aux deux postes. La figure 345 représente un schéma de communication. Le fil de ligne arrive au poste A, où il aboutit au paratonnerre *pf*; un commutateur, constitué par une tige métallique OB, peut prendre les positions OB ou OB_1, et faire communiquer à volonté le fil de ligne, soit avec le recepteur R, soit avec un relais R_1 qui commande une sonnerie d'appel S actionnée par une pile locale P_1. Le récepteur R est relié à l'axe du manipulateur M, dont les communications

grand nombre d'éléments de pile. Avec un courant plus faible, le levier du récepteur est encore attiré par l'électro, mais la pression exercée sur la bande de papier est insuffisante pour produire l'impression des signaux.

avec le sol et avec la pile de ligne P sont disposées comme on l'a indiqué plus haut. — Les deux postes sont exactement symétriques.

Supposons que le poste A veuille correspondre avec A' : l'employé place le commutateur dans la position OB_1, et appuie d'une façon continue sur son manipulateur M ; le contact *b* se ferme, *a* s'ouvre, et le courant de la pile P suit le chemin $PbMRB_1OLL'$; il passe dans le relais R' qui met la sonnerie S'

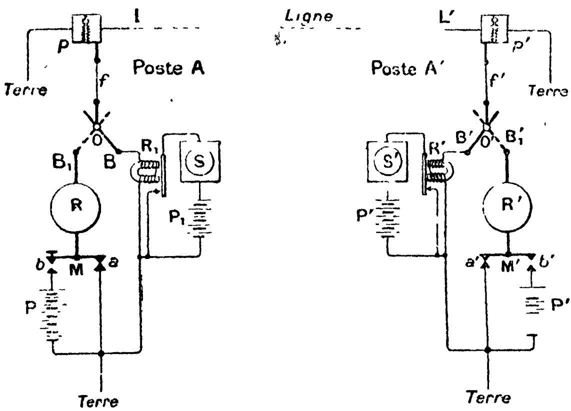


Fig. 345

en mouvement. L'employé du poste A cesse alors de sonner et ramène OB_1 en B, l'employé A' avertit alors, par le même procédé, qu'il est à l'appareil. puis il pousse le commutateur O'B' en B'_1 dans la position de réception. Le poste A ramène OB en B_1 et transmet alors les signaux qui s'inscrivent a la fois sur les deux récepteurs, étant donné le montage indiqué sur la figure ; de cette façon, le bureau A conserve sur son récepteur une copie de la dépêche expédiée au bureau A', ce qui facilite les vérifications.

350. ***Télégraphe imprimant de Hughes.*** — Le télégraphe de Morse écrit la dépêche en caractères qui ne sont déchiffrables qu'avec une certaine habitude. — On fait usage aujourd'hui, sur les grandes lignes télégraphiques, d'appareils qui impriment les dépêches *en caractères ordinaires*, de sorte que la bande imprimée peut ensuite être directement transmise à celui auquel la dépêche est destinée.

Dans le télégraphe qui a été imaginé par M. Hughes, de New-York, le manipulateur présente extérieurement la forme d'un clavier de piano, dont les touches portent les lettres de l'alphabet, les signes de ponctuation, etc. L'expédition de la dépêche se fait avec la même célérité que l'exécution d'un morceau de musique, d'un mouvement rapide. Mais cet appareil présente une complication trop grande pour qu'il nous soit possible de le décrire.

351. ***Appareils à transmissions multiples.*** — Le télégraphe Morse est un appareil très simple et très robuste, mais qui ne peut guère transmettre qu'une quinzaine de mots à la minute, l'appareil imprimant de Hughes, ne nécessitant qu'un signal par lettre, fournit facilement un travail double, trente mots à la minute. Mais le nombre des dépêches à expédier journellement entre Paris et une grande ville, telle que Lyon ou Bordeaux, dépasse de beaucoup ce que l'on peut obtenir d'un appareil unique. Une

solution simple, mais coûteuse, de cette difficulté, consisterait à installer entre les deux stations un nombre de lignes suffisant pour assurer le trafic; on a imaginé une autre solution. — Lord Kelvin a établi une formule qui permet de calculer, pour une ligne donnée, le temps strictement nécessaire à la transmission d'un signal; pour la ligne aérienne Paris-Lyon, c'est environ $\frac{1}{30}$ de seconde; or, l'employé ne peut transmettre plus de 5 signaux par seconde; le fil est donc inutilisé pendant les $\frac{5}{6}$ du temps. — On a cherché à mieux employer le fil de ligne, et c'est ce qui a conduit à l'invention des appareils à transmissions multiples : il n'en existe qu'un très petit nombre; celui qu'on emploie en France est l'appareil Baudot. Dans cet appareil, un organe, appelé *distributeur*, ne livre la ligne à chaque employé que le temps exactement nécessaire pour la transmission d'un signal; l'employé, dont c'est le tour d'utiliser la ligne, en est averti par un téléphone, placé près de son oreille, et qui est commandé par le distributeur lui-même; quatre dépêches peuvent être transmises simultanément; on envoie la première lettre de la première, la première lettre de la deuxième, et ainsi de suite. A l'arrivée, un distributeur synchrone du premier répartit les signaux entre les récepteurs. — Dans le modèle en usage en France, on peut faire quatre transmissions simultanées, une ou plusieurs transmissions pouvant d'ailleurs être remplacées par un nombre égal de réceptions.

352. ***Télégraphie sous-marine. — Câbles sous-marins.*** — Les conditions particulières dans lesquelles doit être établie une ligne télégraphique sous-marine exigent des dispositions spéciales, pour que le conducteur soit bien isolé de l'eau de mer, et pour qu'il présente une résistance suffisante aux tractions qu'il pourra éprouver, soit pendant la pose, soit après son installation.

Un *câble sous-marin*, tel que ceux qu'on emploie aujourd'hui, contient dans son axe un conducteur métallique; c'est un fil de cuivre, ou plutôt un faisceau de fils de cuivre C, exactement juxtaposés (*fig.* 346). La multiplicité des fils présente cet avantage que, s'il vient à se produire quelques ruptures, il y a des chances pour qu'elles ne portent pas au même endroit sur tous les fils, et pour que la transmission puisse encore s'effectuer. — Pour isoler ce conducteur de l'eau de mer, on l'entoure de gutta-percha, ou de diverses substances encore plus isolantes. Le conducteur C et son enveloppe isolante G constituent l'*âme* du câble. — Enfin, l'âme est entourée d'une *armature* formée par une couche de fils de fer F, F, environnés chacun d'une enveloppe de chanvre, et tournés spirale autour de l'âme. L'armature est destinée à protéger l'âme pen

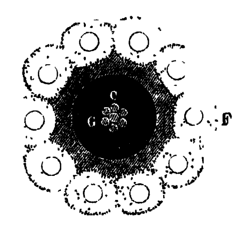


Fig. 346.

dant la pose, à la garantir ensuite des frottements contre les rochers, et enfin à donner de la résistance au câble, s'il vient à être accroché par les ancres des navires (*).

353. *Récepteur de lord Kelvin. — Siphon-recorder* — L'expérience a montré que les récepteurs des divers systèmes précédemment décrits, lorsqu'ils viennent à être placés à l'extrémité d'un câble sous-marin, n'obéissent que lentement aux alternatives d'établissement et d'interruption du courant, déterminées par le manipulateur. Il a donc fallu faire usage d'autres récepteurs.

On a d'abord employé, comme *récepteur*, le galvanomètre de lord Kelvin (299). Selon que, au poste de départ, l'extrémité du fil de ligne est mise en communication avec le pôle positif ou avec le pôle négatif de la pile, la déviation du miroir du récepteur se produit d'un côté ou de l'autre. On obtient ainsi deux signaux différents, que l'on peut combiner comme le *point* et le *trait* du système Morse, pour représenter toutes les lettres de l'alphabet. — Le *manipulateur* de ce système consiste en une sorte de clef métallique, qui permet d'établir rapidement la communication du fil de ligne, soit avec le pôle positif, soit avec le pôle négatif de la pile, et qui, en même temps, met en communication l'autre pôle avec le sol.

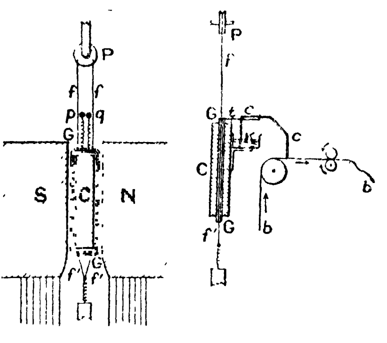


Fig. 347. Fig. 348

Lord Kelvin, en 1867, a substitué, au galvanomètre récepteur, un appareil qui laisse une trace écrite des signaux, et qui porte en anglais le nom de *siphon-recorder*, ou enregistreur à siphon. C'est un galvanomètre apériodique (312), à cadre mobile et à aimant fixe. Le cadre GG (*fig.* 347 vue de face, et 348 vue de profil), formé d'un fil de cuivre de 0,08 millimètre de diamètre, isolé par de la soie, est placé entre les deux pièces polaires N, S d'un aimant très puissant; il est suspendu par un fil de cocon *ff*, à cheval sur une petite poulie P; à la partie inférieure, il est maintenu au moyen d'un autre fil *f'f'* accroché à un ressort à boudin très leger. Comme dans le galvanomètre à cadre mobile (312), un cylindre creux C, en fer doux, est placé à l'intérieur du cadre; il a pour effet d'aug-

(*) Les dangers que peut courir le câble, une fois qu'il est posé, ne sont pas les mêmes pour toute sa longueur. Dans les mers profondes et à une grande distance des côtes, on n'a plus à craindre que le câble soit tiraillé par les ancres des navires : il est même complètement à l'abri des frottements produits par l'agitation des flots, car on sait que, pendant les plus grandes tempêtes, il règne toujours, à partir d'une profondeur de 25 à 30 mètres, un calme absolu, contrastant avec l'agitation de la surface. On réserve donc les armatures puissantes pour les deux extrémités voisines des côtes, pour les *bouts côtiers*. Pour toute la partie intermédiaire, on diminue le diamètre des fils de fer, de manière à réduire la dépense, et à ne pas charger inutilement le navire qui doit effectuer la pose. — Le câble transatlantique posé en 1866, l'un des premiers en date, et l'un des plus légers eu égard à son diamètre (ce diamètre est reproduit exactement dans la figure 346), pesait encore 865 kilogrammes par kilomètre, c'est-à-dire, en tout, près de 4 millions de kilogrammes.

menter l'intensité du champ magnétique dans l'entrefer étroit où se meut le cadre. Le courant est amené dans le cadre par deux spirales très flexibles, mises en communication avec les boutons p et q qui communiquent, l'un avec la ligne, l'autre avec le sol.

Quand le courant passe dans le cadre, celui-ci est dévié de sa position d'équilibre, dans un sens ou dans l'autre, selon le sens du courant lancé par le manipulateur à l'autre extrémité de la ligne. — Au cadre est fixée une tige d'aluminium t, supportant un tube de verre très fin et très léger cc (*), courbé en siphon et plongeant dans une petite cuve K pleine d'encre très fluide. L'encre s'écoule lentement par ce siphon, devant l'extrémité duquel se déroule une bande de papier b, mue par un mouvement d'horlogerie. Quand le cadre est au repos, l'encre trace sur le papier un trait continu rectiligne. Quand le cadre est en mouvement, le trait devient sinueux : les dents à droite ou à gauche correspondent aux courants positifs ou négatifs, lancés par le manipulateur; ce sont les signaux qui correspondent aux points et aux traits du système Morse.

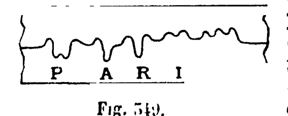


Fig. 349.

La figure 349 montre un spécimen de cette écriture conventionnelle

II. — Téléphone et microphone.

354. *Téléphone de Bell.* — Une application remarquable des courants d'induction est le *téléphone*, qui permet de transmettre des sons ou la parole à de grandes distances.

Le téléphone, tel qu'il a été imaginé en Amérique par Graham Bell, se compose en principe d'une plaque mince de fer M (*fig.* 350) derrière laquelle est fixé un aimant NS. Autour de l'un des pôles, N, par exemple, est assujettie une bobine B, formée d'un fil métallique couvert de soie : les deux extrémités de ce fil sont reliées par deux fils de ligne à un appareil identique, placé au point où se

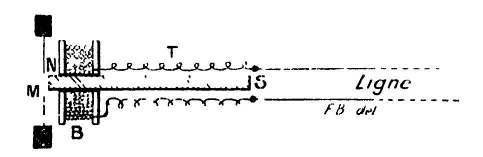


Fig. 350.

trouve la personne avec laquelle on doit entrer en conversation. Nous désignerons les pièces de ce second appareil par les mêmes lettres, affectées de l'indice 1.

Celui des deux interlocuteurs qui prend le premier la parole

(*) L'ensemble du cadre, de la tige d'aluminium et du siphon ne pèse pas plus de 2 grammes.

approche de sa bouche la plaque M du téléphone T qui joue le rôle de *transmetteur*. L'autre appareil, T_1, va jouer le rôle de *récepteur*. — Les impulsions communiquées par la voix, à la petite plaque de fer M du *transmetteur*, déterminent une succession de rapprochements et d'éloignements alternatifs de cette plaque par rapport à l'aimant. A chaque rapprochement, il y a accroissement du magnétisme développé par influence dans la plaque de fer, et, par réaction, accroissement du magnétisme de l'aimant A lui-même; par suite, production d'un courant *induit*, dans le fil de la bobine B. A chaque éloignement, il se produit encore un courant induit, de sens contraire au premier, et ainsi de suite. — Ces courants, en traversant la bobine B_1 du *récepteur*, augmentent ou diminuent alternativement le magnétisme de son aimant $N_1 S_1$: ils ont donc pour effet de faire varier l'attraction du pôle N_1 sur la plaque M_1 et de déterminer, par suite, des rapprochements ou des éloignements alternatifs de cette plaque de fer par rapport à l'aimant, en sorte que les mouvements de cette plaque reproduisent ceux de la plaque du transmetteur. L'air au contact de la plaque M_1, est ainsi mis en vibration, et communique le son à l'oreille de celui qui écoute.

Chacun des deux appareils peut fonctionner alternativement soit comme *transmetteur*, soit comme *récepteur*.

355. ***Combinaison du téléphone et du microphone.*** — Dans la disposition précédente, les courants induits étant très faibles (*), le son est peu intense au point d'arrivée. — L'invention du *microphone*, due à Hughes, a fait faire à la question un progrès considérable. Voici la disposition, d'une simplicité remarquable, qu'il a d'abord imaginée.

Deux petites pièces de charbon conducteur C et C' sont fixées sur une mince planchette de bois MN (*fig.* 351); entre elles est placée une sorte de crayon de charbon A, dont les deux pointes sont reçues dans de petites cavités, de manière qu'il appuie légèrement sur chacune d'elles. On fait passer dans l'appareil le *courant d'une pile*, dont le circuit est mis en communication avec la bobine d'un téléphone, placé à distance. C'est la succession des pièces de charbon qui constitue le *microphone*. — Le microphone va jouer le rôle de

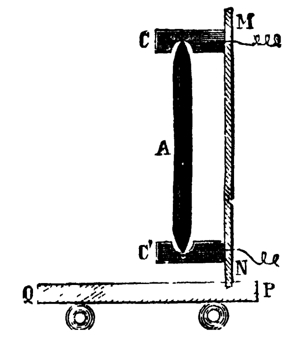


Fig. 351.

(*) On perçoit encore dans le téléphone des sons correspondant à un courant d'un micro-ampère; les sons habituellement utilisés ne doivent pas correspondre à des courants dépassant beaucoup 10 micro-ampères.

transmetteur; le téléphone fonctionnera ici exclusivement comme *récepteur*.

Dès qu'on produit un son dans le voisinage du microphone, les vibrations sonores suffisent pour modifier les contacts du crayon A avec ses supports; il en résulte des variations de pression aux points de contact, et, par suite, des variations de résistance; le courant de la pile éprouve des variations correspondantes d'intensité, qui modifient le magnétisme de l'aimant du téléphone, et qui mettent ainsi sa plaque de fer en vibration.

356. ***Système Ader.*** — Un très grand nombre de modifications ont été apportées, soit au microphone transmetteur, soit au téléphone récepteur.

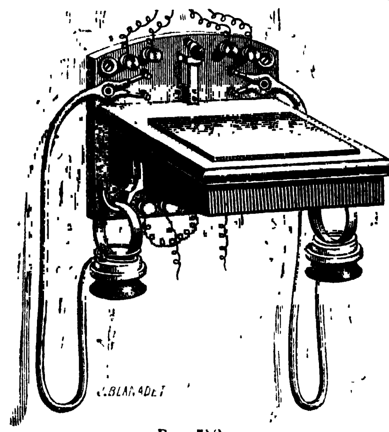


Fig. 352

Dans le système qui a été imaginé par M. Ader, et qui est en France d'un usage courant, le microphone transmetteur est fixé sous une plaque de bois mince, disposée comme la table d'un petit pupitre (*fig.* 352), et devant laquelle on se place pour émettre la voix. — Il se compose d'une série de petites baguettes de charbon (*fig.* 353), assujetties à peu près comme dans le microphone de Hughes, de manière que les contacts de ces baguettes avec leurs supports soient modifiés par les vibrations imprimées à la plaque de bois.

Quant aux téléphones récepteurs, leur disposition diffère un peu de celle du téléphone de Bell. L'aimant est un anneau presque fermé A (*fig.* 354), aux deux pôles duquel on a fixé deux petites pieces polaires en fer doux, E, E entourées de bobines B, B, au-dessus se trouve la lame vibrante en fer doux P. Le champ magnétique dans lequel elle se

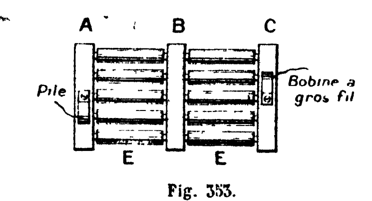


Fig. 353.

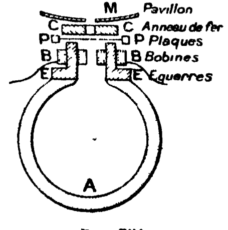


Fig. 354.

trouve placée est renforcé par un anneau de fer doux C, placé au fond de l'embouchure M, en ébonite. Comme on le voit sur la figure 352, un poste comprend deux téléphones récepteurs, un pour chaque oreille.

357. ***Installation d'un double poste téléphonique.*** — Le microphone M sert de transmetteur; il est mis dans le circuit d'une pile P, circuit qui comprend en outre une petite bobine B, à gros fil enroulé sur un faisceau de fils de fer doux N (*fig.* 355); une seconde bobine B' à fil fin, est enroulée sur la première (*). Les deux postes sont symétriques, et la ligne, en général double (**), fait communiquer entre eux les deux enroulements de fil fin B' et B'_1; les téléphones T et T_1 du poste transmetteur et du poste récepteur sont également intercalés dans ce circuit. Supposons que l'on parle devant le microphone M; la bobine B sera parcourue par un courant d'intensité variable; le noyau de fer doux N aura donc une aimantation variable; par suite, le flux magnétique embrassé par la bobine B' sera tantôt croissant, tantôt décroissant; et il y aura production dans B' de courants induits dirigés tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. Ces courants mettront les téléphones T et T_1 en activité. — Chacun des postes comprend en outre

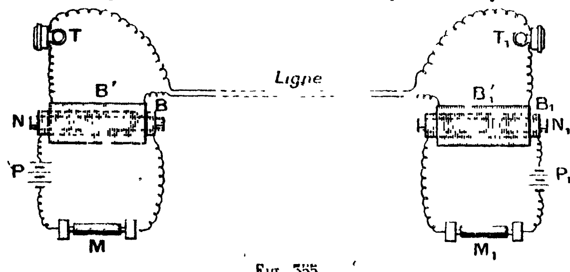


Fig. 355.

une sonnerie d'appel, actionnée, le plus souvent, par une petite machine magnéto-électrique que l'on fait tourner à la main.

Lorsque les téléphones récepteurs sont accrochés (*fig.* 352), c'est la sonnerie qui est dans le circuit de la ligne; l'un d'eux (celui de droite, dans la figure) est supporté par un crochet mobile à ressort; quand on le décroche, le ressort, qui était fléchi sous l'action du poids du récepteur, se soulève, ouvre le circuit de la sonnerie, et met les téléphones récepteurs et la bobine B' dans le circuit de la ligne.

Dans les installations urbaines, les lignes de tous les abonnés aboutissent à un bureau central, dont les employés ont pour mission de mettre en communication les lignes de deux abonnés, quand l'un d'eux en fait la demande.

III. — Applications de la loi de l'action électromagnétique et de la loi de l'induction. — Machine de Gramme.

358. ***Description de la machine de Gramme.*** — La machine de

(*) La résistance de la bobine B n'est guère que d'un ohm; celle de la bobine B' atteint 150 ohms.

(**) Les fils en bronze silicieux ou en bronze phosphoreux sont ceux qui paraissent le plus avantageux. L'emploi de la Terre comme conducteur de retour, commode dans le cas des appareils télégraphiques, donne de mauvais résultats avec le téléphone. Cela tient à ce que les courants qui se propagent dans le sol sont ordinairement trop faibles pour avoir une action sensible sur un recepteur Morse; ils ont au contraire, en raison de leurs variations continuelles d'intensité, un effet fâcheux sur un récepteur téléphonique.

Gramme(*) se compose, en principe, d'un *circuit mobile* autour d'un axe, dans un *champ magnétique fixe*. Si l'on fait passer un courant dans le circuit, l'action électromagnétique du champ mettra le circuit en mouvement comme dans la roue de Barlow (309); si, au contraire, au moyen d'une force motrice extérieure, on fait tourner le circuit, il apparaîtra dans ce circuit une force électromotrice d'induction qui produira un courant induit (333). Dans le premier cas, la machine constitue un *moteur électrique*, et fonctionne comme *réceptrice*; dans le second cas, c'est une machine d'induction, elle fonctionne alors comme *génératrice*.

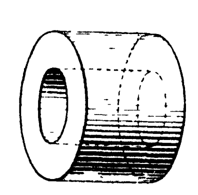


Fig. 356.

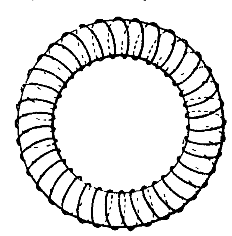


Fig. 357.

Circuit mobile : anneau de Gramme. — Le circuit mobile est constitué par un fil de cuivre isolé, enroulé autour d'un anneau ou, plus exactement, d'un manchon de fer doux (*fig.* 356), qu'on appelle *armature*, et qui peut tourner autour de son axe. Toutes les spires sont enroulées dans le même sens, et forment *un circuit unique fermé sur lui-même* (*fig.* 357).

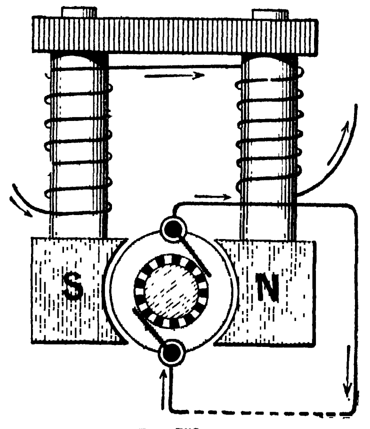


Fig. 358.

Champ magnétique fixe. — L'anneau est placé entre les pièces polaires N,S (*fig.* 358) d'un aimant, ou mieux d'un électro-aimant puissant; ces pièces polaires ont été évidées, de façon à ménager entre elles une cavité cylindrique dans laquelle est placé l'anneau. — L'épaisseur comprise entre les pieces polaires et la surface du fer du manchon, et qu'on nomme *l'entre-fer*, est très faible; il suffit qu'on puisse y loger le fil de cuivre du circuit mobile, et que, pendant le mouvement, les spires de fil ne viennent pas frotter contre le fer de l'aimant.

(*) Gramme (1826-1901), ouvrier mécanicien, peut être considéré comme le père de l'industrie électrique actuelle; l'invention de l'induit, auquel son nom est resté attaché, date de 1871.

Si la cavité où est logé l'anneau était vide, le champ y serait sensiblement uniforme; mais, en raison de la grande perméabilité du fer, le flux magnétique émané du pôle N (*fig.* 359) se bifurque, pour passer dans le fer de l'armature; il n'en passe plus à l'intérieur de l'anneau. Les deux branches du flux se rejoignent, puis passent dans le pôle S après avoir traversé une seconde fois l'entre-fer. — La figure 360 représente le champ magnétique tel qu'on l'observe avec la limaille de fer.

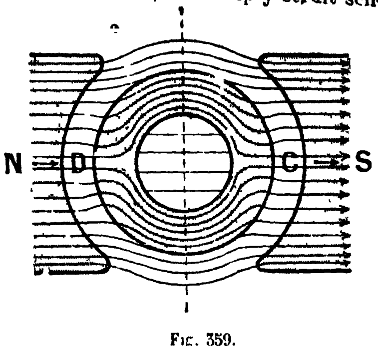


Fig. 359.

Si l'anneau tourne autour de son axe, le champ conserve la même forme, car aucune modification ne se produit dans la forme d'ensemble de l'aimant et de l'armature; le flux magnétique qui traverse l'entre-fer et pénètre dans l'anneau reste lui-même fixe; le fer doux de l'armature glisse, en quelque sorte, sur son magnétisme; par suite, l'aimantation de chaque fragment de fer de l'anneau change de sens deux fois par tour. Ces aimantations périodiques de sens contraires produisent, dans l'armature, des effets d'hystérésis (324) et absorbent une certaine quantité d'énergie.

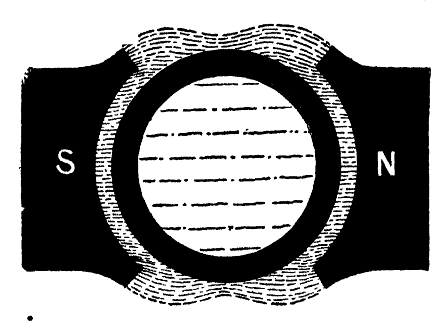


Fig. 360.

Collecteur. — Sur l'axe de rotation de l'anneau, est monté un organe appelé *collecteur*. Il se compose d'une série de lames de cuivre *f*, *f* (*fig.* 361, lignes noires épaisses) disposées suivant les génératrices d'un cylindre solidaire de l'anneau, et ayant même axe que lui; ces lames sont isolées les unes des autres. Le

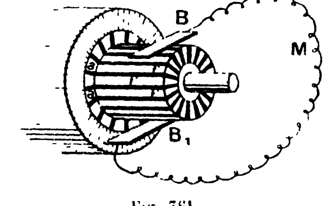


Fig. 361.

fil de cuivre de l'anneau est partagé en un certain nombre de sections contenant chacune un même nombre de spires (quatre sur la figure); la dernière boucle de chaque section communique avec la

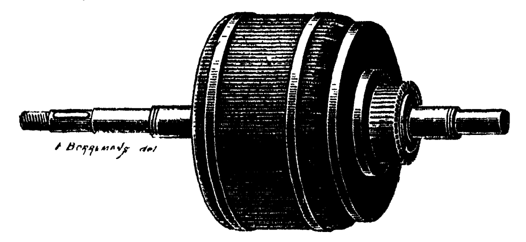


Fig. 362.

lame de cuivre correspondante, par une tige de cuivre *a*, dirigée suivant un rayon du manchon.

La figure 362 représente un induit complet monté sur son axe de rotation.

Balais. — Enfin, deux balais B,B_1 formés soit d'un faisceau de fils de cuivre, soit le plus souvent d'un prisme de charbon C (*fig.* 363), sont légèrement appuyés, par des ressorts sur les lames de cuivre du collecteur, aux deux extrémités d'un même diamètre que nous supposerons perpendiculaire à la direction générale du champ magnétique fixe. Ces balais sont reliés à un circuit extérieur M (*fig.* 361); ils ont en somme pour rôle de mettre chaque lame de cuivre du collecteur, et, par suite, la boucle correspondante de l'anneau, en communication avec le circuit extérieur, au moment où cette lame vient frotter contre le balai.

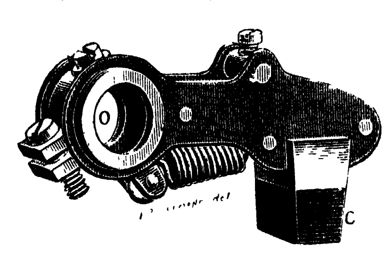


Fig. 363.

La figure 364 donne une vue d'ensemble d'une machine Gramme; on y distingue facilement les divers organes que nous venons de décrire sommairement.

359. ***Machine de Gramme fonctionnant comme réceptrice, ou moteur électrique.*** — Mettons une pile ou une batterie d'accumulateurs P dans le circuit extérieur (*fig.* 365), le pôle positif étant au balai B et le pôle négatif en B′; le courant pénètre dans le circuit mobile au point A, se bifurque et se propage dans le sens indiqué par les flèches; les deux parties du courant se réunissent au balai B′

et reviennent à la pile, et cela quelle que soit la position de l'anneau,

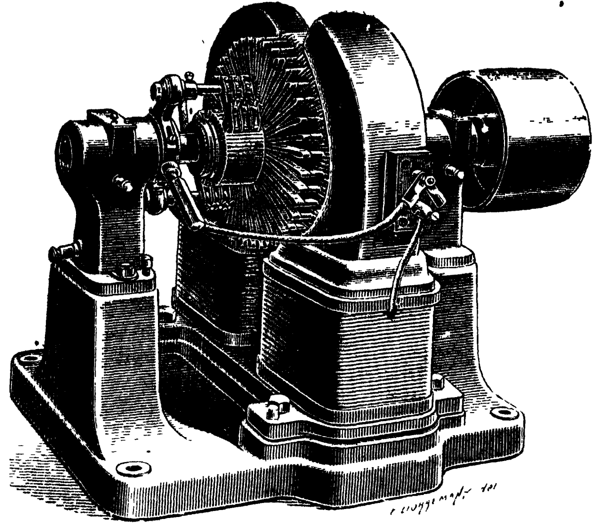


Fig. 364.

puisque les lames de cuivre du collecteur sont assez nombreuses pour qu'il y en ait toujours une en contact avec chaque balai.

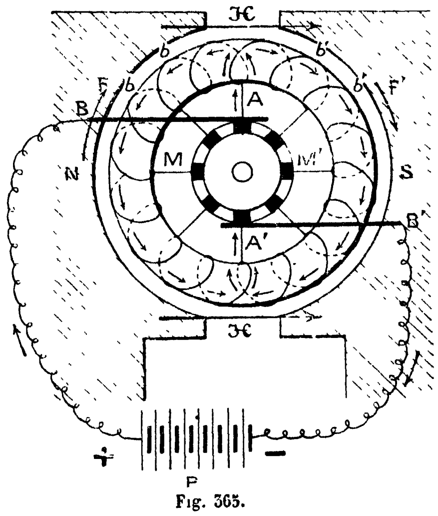


Fig. 365.

En appliquant la règle des trois doigts (*main droite*, 307, *Note*) on va trouver sans peine la direction de la force électromagnétique exercée par le champ ℋ sur les portions *b*,*b*, *b'b'*, du fil situées sur la surface extérieure de l'armature ; la portion du circuit mobile qui passe à l'intérieur de l'anneau n'est soumise à aucune force, le champ y étant sensiblement nul (il est concentré dans l'entrefer). Dans les portions

b, b de la moitié AM de l'anneau, le courant vient d'arrière en avant du plan de la figure; dans les parties b', b' de la moitié AM', il va au contraire d'avant en arrière; la figure 366 montre que dans la moitié M la force magnétique appliquée au courant est dirigée vers le haut, et que dans la moitié M' elle est dirigée vers le bas. L'anneau sera donc, dans le cas de la figure, entraîné dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre,

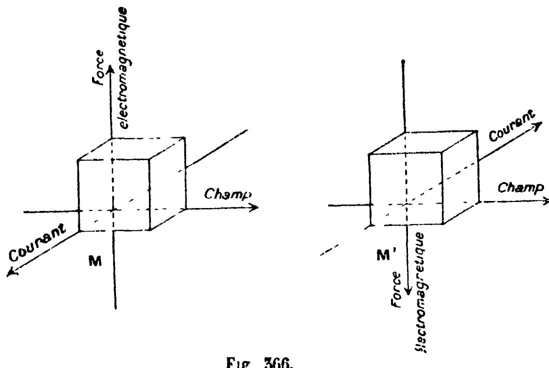


Fig 366.

par un couple dont le moment sera constant; la vitesse croîtra jusqu'à ce que le travail des forces électromagnétiques soit, par seconde, égal au travail résistant (travail utile et travail absorbé par les résistances passives).

La machine fonctionne donc bien comme *réceptrice*, elle constitue un *moteur électrique* (230).

La force électromotrice inverse de ce moteur est, en se reportant à la formule de Faraday (311)

$$e = \frac{\Phi_1}{10^8} \text{ volts,}$$

Φ_1 étant le flux de force magnétique coupé (310) par le circuit mobile pendant une seconde. Appelons Φ le flux total qui sort de N pour pénétrer dans l'anneau à travers l'entrefer D (*fig.* 359); chaque spire de fil le coupe complètement pendant une demi-révolution de l'anneau, de A' en A (*fig.* 364); s'il y a p spires en tout, il en pas sera $\frac{p}{2}$ de A' en A pendant un demi-tour, et le flux total coupé pendant ce temps sera $\Phi . \frac{p}{2}$; si l'anneau fait n révolutions par seconde, il mettra $\frac{1}{2n}$ secondes pour faire une demi-révolution, et le flux Φ_1

coupé par seconde sera

$$\Phi_1 = \Phi \frac{p}{2} : \frac{1}{2n} = np\Phi.$$

La force électromotrice inverse sera donc :

$$e = \frac{1}{10^8} np\Phi \text{ volts.}$$

Nous savons d'ailleurs (231) que la différence de potentiel des balais B et B′ est :

$$V_B - V_{B'} = e + ir,$$

i étant l'intensité du courant dans *chacune* des deux moitiés du circuit mobile, et r la résistance de *chacune* de ces deux moitiés.

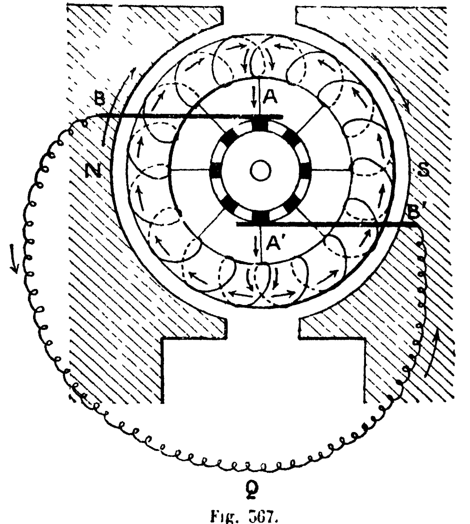


Fig. 367.

360. ***Machine fonctionnant comme génératrice.*** — Supprimons la pile P, et réunissons les deux balais par un conducteur extérieur Q (*fig.* 367) de résistance r_1 ; puis, au moyen d'un moteur quelconque, machine à vapeur, turbine, etc., faisons tourner l'anneau avec la même vitesse et dans le même sens que précédemment ; il apparaîtra, dans les deux moitiés de l'anneau, des forces électromotrices d'induction ; d'après la loi de Lenz, ces forces électromotrices produiront, dans chaque moitié, un courant inverse de celui qui circulait lorsque la machine, tournant dans le même sens, fonctionnait comme réceptrice.

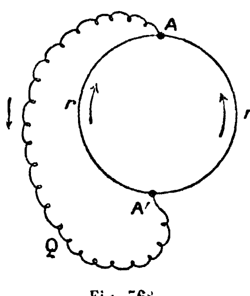


Fig. 368.

Les figures 367 et 368 montrent la direction des courants induits (*).

Si l'on ne réunit pas les balais par un

(*) La règle des trois doigts, appliquée avec la *main gauche* (353), permet d'ailleurs de trouver immédiatement la direction de ces courants.

conducteur extérieur Q, les deux moitiés de l'anneau, étant le siège de forces électromotrices égales et opposées, ne seront parcourues par aucun courant.

Pour une même vitesse de rotation, et pour une même valeur du flux, la force électromotrice de la machine fonctionnant comme génératrice sera encore :

$$e = \frac{1}{10^8} np\Phi \text{ volts.}$$

Si r_1 désigne la résistance du circuit extérieur AQA′, et r la résistance de *chacune* des deux moitiés de l'anneau, l'intensité I du courant dans le conducteur extérieur, ne contenant pas de force électromotrice inverse, sera (234),

$$I = \frac{e}{r_1 + \frac{r}{2}}.$$

En résumé, on voit que la force électromotrice d'une machine Gramme est proportionnelle :

1° Au nombre de spires enroulées sur l'armature;

2° Au flux utile qui traverse l'armature;

3° A la vitesse de rotation de l'anneau.

Il faudra donc réaliser un flux magnétique intense, d'où l'emploi d'électro-aimants puissants, contenant beaucoup de fer, et pour les noyaux desquels, comme nous l'avons déjà vu, il sera bon d'employer de l'acier doux, de préférence à la fonte, dont la perméabilité est beaucoup plus faible que celle de l'acier (323).

Il sera également nécessaire de donner à l'anneau une vitesse considérable, pour que la variation du flux soit aussi grande que possible dans un temps donné. On serait ainsi conduit, pour avoir une grande vitesse des spires, à donner à l'anneau un diamètre exagéré; pour tourner cette difficulté, on produit le champ magnétique inducteur, non plus au moyen de deux pôles, mais avec 4, 6, 8... pôles alternés (pour des anneaux de 4m,50 de diamètre, le nombre des pôles, *qui est nécessairement pair*, va jusqu'à 22). Dans ces machines multipolaires, quand une spire passe d'un pôle nord au pôle sud suivant, c'est-à-dire quand elle décrit un angle égal à $\frac{2\pi}{n}$ n étant le nombre des pôles, la variation du flux est la même que pour un demi-tour de l'anneau dans la machine à deux pôles que nous avons décrite. — Dans l'intervalle compris entre deux pôles consécutifs, un balai doit être placé sur le collecteur; il faudra donc autant de balais que de pôles. — Tous les balais d'ordre impair seront reliés ensemble et formeront l'un des pôles de la machine; ceux d'ordre pair, également reliés ensemble constitueront l'autre pôle.

La figure 369 représente une vue d'ensemble d'une machine à quatre pôles.

361. ***Calage des balais.*** — Nous avons supposé que les balais frottent sur le collecteur, aux deux points A et A′ (*fig.* 366) situés

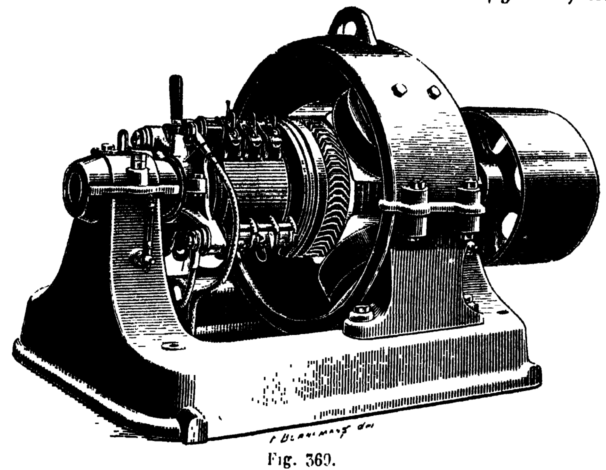


Fig. 369.

aux deux extrémités d'un même diamètre perpendiculaire à la direction générale du champ magnétique fixe, c'est en ces deux points que le courant change de sens dans l'anneau, et par suite, ce sont les deux points de l'anneau présentant entre eux la différence de potentiel maximum; or, l'expérience montre que, si l'on place ainsi les balais, des étincelles jaillissent entre les balais et les lames du collecteur, de sorte que le collecteur serait rapidement détérioré. En cherchant quels sont les points de contact pour lesquels les étincelles sont réduites au minimum, on trouve que le diamètre A′B′ qui les joint fait avec le diamètre de contact théorique AB, et *dans le sens du mouvement*, un certain angle aigu, auquel on a donné le nom d'*angle de calage* des balais (*fig.* 370).

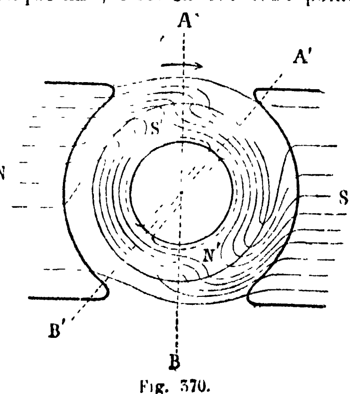


Fig. 370.

Sans entrer dans les détails, nous nous bornerons à dire que ces étincelles sont des étincelles de rupture, dues à la self-induction mise en jeu quand le courant change de sens dans une section du circuit induit, au moment où cette section traverse la ligne neutre AB. — Il y a d'ailleurs une autre raison qui nécessite le décalage des balais : l'armature est aimantée par le courant qui circule dans l'induit, et, en examinant le sens du courant, on voit sans peine que l'anneau présente une région sud en A et une région nord en B ; le champ devient alors dissymétrique et les lignes d'induction présentent l'aspect représenté figure 369, le diamètre A'B' perpendiculaire à la direction N'S' est déplacé d'un certain angle, dans le sens du mouvement.

362. ***Production du champ magnétique inducteur*** — Dans la réalité, ce sont généralement des électro-aimants qui créent le

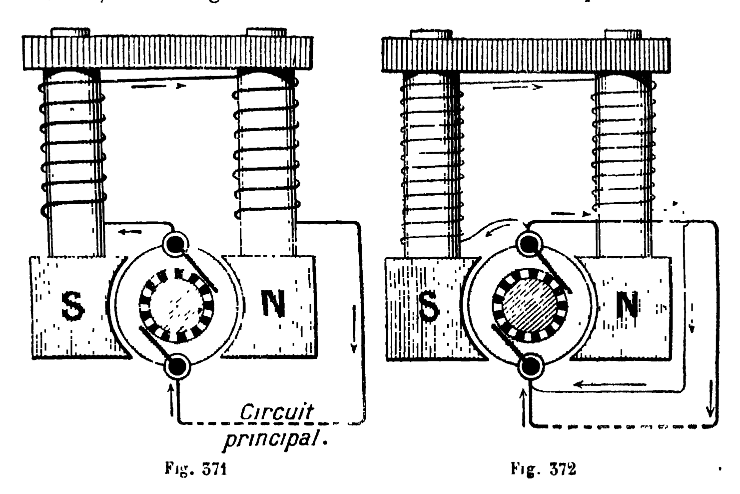


Fig. 371 Fig. 372

champ magnétique inducteur (*) ; la machine fonctionnant comme *génératrice* s'appelle alors une machine *dynamo-électrique* ou simplement une *dynamo*. — L'excitation des électro-aimants peut être produite par un courant électrique distinct, fourni par une machine magnéto-électrique auxiliaire ; c'est l'excitation dite *séparée* (*fig.* 358). — Mais, dans la plupart des cas, on évite cette complication, en introduisant le fil de l'électro-aimant dans le circuit même des conducteurs que doit parcourir le courant induit continu ; et alors, ou bien les électro-aimants sont actionnés par la totalité du courant induit, et la machine est dite *excitée en série* (*fig.* 371), ou bien une fraction seulement du courant induit est dérivée dans les électro-aimants, et la machine est dite *excitée en dérivation* (*fig.* 372).

(*) Toutefois, les petites machines d'induction qui alimentent les sonneries des postes téléphoniques sont des machines *magnéto-électriques*, c'est-à-dire dans lesquelles le champ inducteur est créé par des aimants permanents.

En tout cas, on peut considérer le noyau de l'électro-aimant inducteur comme possédant, avant que la machine soit mise en mouvement, une aimantation faible, qui est due au magnétisme rémanent. Cette faible aimantation suffit pour donner naissance, dès que la rotation commence, à un courant induit, qui développe lui-même dans l'électro-aimant une aimantation de plus en plus grande, jusqu'au moment où la machine atteint son régime régulier.

363. ***Rendement industriel d'une génératrice.*** — On appelle *rendement industriel* d'une génératrice, le *rapport qui existe entre la puissance électrique recueillie dans le circuit extérieur de la machine et la puissance mécanique totale qu'elle absorbe.* Si V — V′ est la différence de potentiel aux bornes de la machine, et I l'intensité du courant extérieur, la puissance du courant dans le circuit extérieur (220) sera I (V — V′); et le rendement industriel aura pour expression :

$$\frac{I(V-V')}{P},$$

P étant la puissance mécanique prise sur le moteur (turbine, machine à vapeur) qui fait tourner la génératrice.

La valeur de ce rendement n'est jamais, pour une bonne génératrice, inférieure à 0,80; la dynamo est donc un excellent transformateur d'énergie; il se produit, au maximum, 0,20 de perte. Il est d'ailleurs intéressant de rechercher les causes de cette perte d'énergie; ce sont surtout : 1° l'échauffement du circuit induit et du circuit inducteur : c'est une conséquence de la loi de Joule, que l'on ne peut éviter; 2° la production de courants de Foucault (338) dans l'armature; en effet, la masse de fer de l'anneau se déplaçant dans un champ magnétique intense est nécessairement le siège de courants de Foucault, que l'on atténue en formant l'armature de disques annulaires de tôle de fer doux (*fig.* 373), empilés les uns sur les autres, et séparés par des couches de vernis ou des feuilles de papier; 3° l'hystérésis du fer de l'armature (325 et 358); 4° enfin, les frottements inévitables dans toutes les machines où des pièces sont en mouvement.

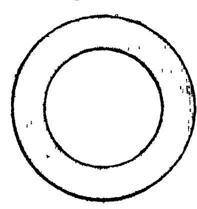


Fig. 373.

364. ***Transport de l'énergie par les courants.*** — Le courant qui actionne un moteur électrique peut être fourni par *une autre machine* semblable, et l'on est ainsi conduit à réaliser la combinaison suivante : deux machines dynamo-électriques auront leurs pôles réunis entre eux par un circuit conducteur. L'une d'elles sera mise en mouvement par un moteur quelconque (machine à vapeur, tur-

bine), et se comportera comme un *générateur* de courants électriques : ce sera la *génératrice*. L'autre machine, recevant le courant produit par la première, sera une *réceptrice* : sous l'action de ce courant, elle se mettra en mouvement, et se comportera alors comme un moteur électrique, permettant d'effectuer tel ou tel travail.

L'expérience est facile à faire, dans les Cours, avec deux machines de Gramme. — Elle fut réalisée pour la première fois avec deux machines industrielles, en 1873, à l'Exposition de Vienne. La génératrice était mise en mouvement par un moteur à gaz; le courant était transmis à une autre machine, située à une distance de 1 kilomètre; la réceptrice faisait fonctionner une pompe.

Ces applications ont pris, dans l'industrie, une importance qui devient chaque jour plus considérable. — C'est ainsi qu'on peut utiliser un grand nombre de sources naturelles d'énergie, telles que des chutes d'eau, restées jusque-là sans emploi en raison de leur éloignement des points où l'on peut placer de grandes usines. On installe une machine génératrice au point où se trouve la chute d'eau, et l'on met cette machine en communication, par des fils conducteurs, avec une machine réceptrice placée à une distance plus ou moins grande, dans l'usine elle-même : l'énergie transportée peut alors être utilisée, soit pour un travail mécanique, soit pour des opérations de métallurgie, soit pour l'éclairage électrique, etc.

C'est ainsi encore que les grandes usines électriques, placées dans les faubourgs d'une ville, peuvent transmettre en divers points de la ville, sous forme de courants, l'énergie fournie par une machine à vapeur ou par tout autre moteur, énergie qui peut ensuite être utilisée en ces divers points, pour des travaux industriels.

En particulier, dans les voitures *automobiles* mues par l'électricité, le moteur qui imprime le mouvement aux roues est une machine dynamo-électrique réceptrice, installée sur la voiture elle-même, et dont la construction est plus ou moins simplifiée, pour que son poids ne soit pas trop considérable.

Dans les *automobiles sur route*, le courant qui actionne le moteur est fourni par des accumulateurs (*), portés également par la voiture. On fait généralement en sorte qu'ils puissent suffire, sans être rechargés, à un parcours d'au moins 60 à 80 kilomètres.

Les *automobiles sur rails*, ou *tramways électriques*, tels qu'on les construit aujourd'hui, se rapportent à deux types différents : 1° ceux dont le moteur électrique est actionné par une batterie d'accumulateurs, comme dans les automobiles sur routes; les accu-

(*) Ces accumulateurs sont chargés à l'usine par une génératrice.

mulateurs sont rechargés ou remplacés, soit aux extrémités de la ligne, soit à des stations intermédiaires; 2° ceux dont le moteur est actionné, pendant la marche, par le courant fourni par une machine dynamo-électrique puissante, installée à l'une des extrémités de la ligne. La transmission du courant se fait alors au moyen d'un conducteur, aérien ou souterrain, disposé parallèlement à la ligne, dans toute sa longueur. — Les conducteurs *aériens* sont en cuivre ou en bronze siliceux; ils sont supportés par des poteaux et placés assez haut, afin de ne pas gêner la circulation; une roulette en bronze, appelée *trolley*, et placée à l'extrémité d'une perche métallique installée sur le toit du tramway, est maintenue en contact permanent avec le conducteur au moyen de ressorts; c'est par l'intermédiaire du trolley et de la perche que le courant arrive à la machine motrice, pour s'écouler ensuite par les rails. — Quand le conducteur est *souterrain*, il est placé dans un caniveau présentant une fente longitudinale étroite, dans laquelle pénètre une pièce qui porte le trolley ou le frotteur qui transmet le courant.

365. ***Problème pratique du transport électrique de l'énergie.*** — En pratique, on dispose en une station A d'une certaine puissance mécanique (chute d'eau, par exemple), en une autre station B, située à une distance plus ou moins grande de A, on a besoin d'une puissance déterminée qu'il s'agit de prélever sur la puissance disponible en A, et de transporter en B au moyen d'un courant électrique, et cela *le plus économiquement possible.*

Le problème pratique du transport comprend donc les deux questions suivantes :

1° Quel est le générateur électrique à installer en A?

2° Quelle doit être la section du fil de cuivre dont la ligne sera formée?

Quant aux données, ce sont :

1° La distance l des deux stations A et B,

2° La puissance P que l'on veut avoir en B.

D'abord, la puissance à prélever en A sera supérieure à P, car une fraction de cette puissance sera dépensée le long de la ligne en chaleur de Joule (223); il faudra donc consentir à perdre de ce chef une certaine fraction de l'énergie prise en A; la valeur numérique de cette fraction dépendra naturellement de la longueur de la ligne, et aussi du prix de revient de l'énergie en A; mais elle devra être fixée d'avance : ce sera une troisième donnée du problème.

Dans ces conditions, on peut montrer que le prix de revient de la ligne est inversement proportionnel au carré du voltage aux bornes de la génératrice placée à la station A. Supposons, en effet, que l'on consente à perdre en ligne la n^e partie de l'énergie disponible en A, et soit E volts la différence de potentiel aux bornes du géné-

rateur. La puissance P watts disponible en B est égale à la fraction $\frac{n-1}{n}$ de la puissance X disponible en A; donc

$$X = P \cdot \frac{n}{n-1};$$

l'intensité du courant, en ampères, sera donnée par la formule (227) :

$$I = \frac{X}{E} = \frac{P}{E} \cdot \frac{n}{n-1};$$

la résistance totale de la ligne s'obtiendra en appliquant la formule de Joule (223) à l'énergie dissipée en chaleur le long de la ligne

$$\frac{X}{n} = RI^2,$$

d'où, en remplaçant X et I par leurs valeurs,

$$R = \frac{n-1}{n^2} \cdot \frac{E^2}{P}.$$

Mais d'après la définition de la résistance (218

$$R = \rho \cdot \frac{2l}{s},$$

$2l$ cm étant la longueur du câble (aller et retour) de A à B, s cm² sa section, et ρ la résistivité du cuivre ($\rho = 1{,}56 . 10^{-6}$ ohm-centimètre). Égalons ces deux valeurs de R, il vient

$$\frac{n-1}{n^2} \cdot \frac{E^2}{P} = \rho \cdot \frac{2l}{s}.$$

Mais d étant la densité du cuivre, et a francs le prix du gramme de cuivre, le prix du câble sera de

$$N^f = 2lsda.$$

De ces deux dernières équations, on déduit sans peine, en les multipliant membre à membre

$$NE^2 = \frac{4n^2}{n-1} \rho l^2 adP;$$

le second membre ne contient que des quantités données, donc N est bien inversement proportionnel à E² (*). Les hauts voltages, et par suite les faibles intensités offrent donc au point de vue économique des conditions particulièrement avantageuses pour le trans-

(*) Ce calcul n'a d'intérêt pratique, que si la distance l est assez grande pour que le prix d'établissement de la ligne forme une partie notable du prix de revient total de l'installation.

port électrique de l'énergie. On sera donc conduit à choisir une génératrice à voltage élevé; toutefois, quand le voltage d'une dynamo à courant continu devient un peu grand (cinq à six cents volts), les étincelles inévitables qui jaillissent entre les lames du collecteur et les bobines, acquièrent une intensité telle que le collecteur est vite détérioré; aussi, pour profiter des avantages d'un voltage élevé, utilise-t-on presque toujours des dynamos à courants alternatifs (*).

IV. — Applications de la loi de Joule Éclairage et chauffage électriques.

366. ***Élévation de température d'un conducteur parcouru par un courant.*** — Nous avons vu (223) que si, entre les deux extrémités d'un conducteur de résistance R, on établit une différence de potentiel E, il apparaît, par seconde, dans ce conducteur, une quantité de chaleur:

$$Q = \frac{1}{4,18} RI^2 = \frac{1}{4,18} \cdot \frac{E^2}{R} \text{ calories}$$

La température de ce conducteur va s'élever jusqu'à une *certaine valeur fixe*, qui sera atteinte lorsque la chaleur perdue, par rayonnement, par conduction, ou pour toute autre cause, sera, par seconde, egale à la chaleur versée par le courant.

Si cette température fixe est assez élevée pour que le conducteur soit porté à l'incandescence, il pourra servir à l'*éclairage*; pour obtenir ce résultat, on devra chercher à produire le degagement de chaleur dans un conducteur de faibles dimensions, de manière à élever le plus possible la température. Deux moyens sont actuellement employés pour la production de la lumière électrique : l'*arc voltaïque* et l'*incandescence*.

Dans tous les cas, le conducteur fonctionnera comme source de chaleur, et pourra être utilisé pour le *chauffage*.

367. ***Arc voltaïque.*** — Lorsqu'on rapproche les extrémités des conducteurs qui terminent les pôles d'une pile, on n'observe généralement pas d'étincelle; la différence de potentiel des deux pôles est trop faible pour que les électricités contraires puissent se combiner au travers de l'air (**). — Mais si, après avoir réuni les deux conducteurs, on vient à les séparer, on observe toujours une *étincelle de rupture* (337).

Une fois la rupture produite, si les extrémités des conducteurs

(*) Nouveau Cours de Physique élémentaire (classe de Mathématiques A et B).

(**) Avec une pile de 1500 à 2000 éléments, Davy a cependant obtenu, en approchant les extrémités des fils à une distance d'une fraction de millimètre, une série continue de petites étincelles

sont maintenues à une petite distance l'une de l'autre (un centimètre, par exemple), et si l'on opère avec une pile ayant une force électromotrice d'une quarantaine de volts, on obtient un phénomène continu. — C'est ce qu'a constaté pour la première fois Davy, en employant comme conducteurs deux pointes de charbon (*fig.* 374). Si les deux charbons sont disposés horizontalement, la flamme, constituée par l'air chaud et les parcelles de charbon incandescentes, tend à s'élever dans l'air qui l'environne, et prend la forme d'un arc : c'est l'*arc voltaïque*. — Des particules de charbon sont transportées du pôle positif au pôle négatif : le charbon positif s'use en effet plus rapidement que le charbon négatif, et la pointe positive se creuse progressivement en forme de cratère (*fig.* 375).

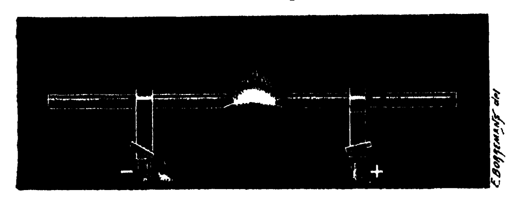


Fig. 374.

L'arc voltaïque se comporte comme un récepteur à force électromotrice inverse (231); l'expérience montre que la valeur de cette force électromotrice est égale à 35 volts environ. Si donc la différence de potentiel produite entre les charbons par le générateur tombe au-dessous de cette valeur, l'arc s'éteindra.

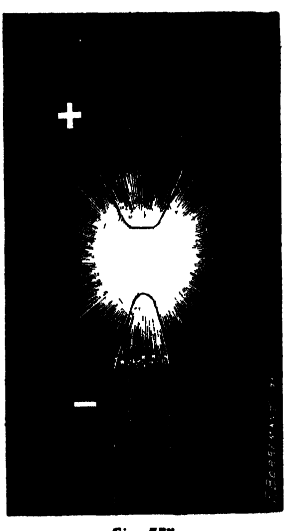


Fig. 375.

La température de l'arc voltaïque est une des plus élevées que l'on puisse réaliser artificiellement : les substances les plus réfractaires, la chaux, la magnésie, le charbon lui-même, y entrent en fusion. — La pointe du charbon négatif atteint une température d'environ 2500° et le fond du cratère du charbon positif une température de 3500°, qui paraît être la température d'ébullition du carbone. — Quant à l'éclat de la lumière, il est dû à la vive incandescence des extrémités des charbons, et surtout du charbon positif, plutôt qu'au pouvoir éclairant de l'arc lui-même.

365. ***Lampes à arc.*** — L'arc voltaïque constitue une source de

lumière très intense, qui est utilisée pour l'éclairage dans les *lampes électriques à arc*. L'arc est produit entre deux crayons de charbon artificiel aggloméré; l'expérience a montré que la qualité des charbons, et surtout leur homogénéité, a une grande influence sur le rendement lumineux des lampes à arc. Pour actionner ces lampes on emploie exclusivement les courants produits par les machines d'induction, en se servant parfois, comme intermédiaire, d'une batterie d'accumulateurs.

Pour conserver constante l'intensité lumineuse, il est nécessaire que les extrémités des baguettes de charbon soient maintenues toujours à la même distance, malgré leur usure progressive. Dans certains cas (projecteurs électriques des bateaux), on y arrive en réglant à la main la distance des charbons; mais le plus souvent le rapprochement des charbons est obtenu au moyen de *régulateurs* automatiques, dont la partie essentielle est un électro-aimant actionné par une dérivation prise sur le courant lui-même.

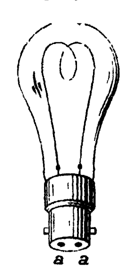
L'expérience montre que l'énergie absorbée par une lampe à arc croît moins vite que l'intensité du foyer lumineux produit; il y a donc économie à employer, quand cela est possible, des arcs puissants. Un arc dont l'intensité est de 1000 bougies décimales (14) nécessite, pour un fonctionnement régulier, une différence de potentiel aux bornes d'environ 50 volts, et une intensité de 15 ampères; la puissance consommée est donc 15×50, ou 750 watts, c'est-à-dire un cheval-vapeur environ; cela représente une consommation de 0,75 watts par bougie.

Un des inconvénients de l'éclairage par l'arc voltaïque est la nécessité de changer assez souvent les charbons, la combustion produisant une usure assez rapide (de 2 à 3 centimètres par heure pour le charbon positif, et la moitié seulement pour le charbon négatif); aussi, on a cherché à éviter cette usure, au moins en grande partie, en plaçant l'arc en vase clos. Au début de l'allumage, l'oxygène renfermé dans la lampe est presque immédiatement transformé en gaz carbonique; comme on ne laisse rentrer l'air qu'avec une extrême lenteur, la combustion est extrêmement lente (*). Ces lampes fonctionnent sous une différence de potentiel de 80 volts et avec un courant de 4 à 5 ampères seulement. L'usure des charbons est 20 fois plus faible que dans une lampe à l'air libre; avec un charbon positif de 30 centimetres, la lampe peut donc fonctionner 200 heures.

La lampe à arc est un foyer très intense, qui ne convient que pour l'éclairage des rues, des chantiers, et en général lorsque la surface à éclairer est considérable. Pour les usages domestiques, il est préférable d'employer des foyers beaucoup plus faibles, les lampes électriques à incandescence.

(*) On ne pourrait pas supprimer complètement l'arrivée de l'air, car il se déposerait du charbon sur la paroi intérieure du globe, qui deviendrait vite opaque.

369. *Lampes à incandescence.* — La lumière par incandescence est obtenue par l'échauffement d'un corps réfractaire, sous l'influence d'un courant qui le traverse. La matière communément employée est le charbon, amené à l'état de filament de la grosseur d'un crin de cheval. Ce filament est obtenu aujourd'hui en faisant passer, à la presse, à travers une filière, une pâte de cellulose dissoute dans du chlorure de zinc ou de l'acide sulfurique; le fil est ensuite calciné en vase clos, à haute température, puis fixé par ses deux extrémités à deux fils de platine ou d'acier au nickel spécial ayant même coefficient de dilatation que le verre, soudés dans un petit globe de verre (*fig.* 376) où l'on fait ensuite le vide avec une machine à mercure (*).



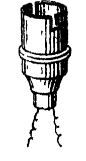


Fig. 376

Le filament de charbon, porté par le courant à une température de 1600 à 1700 degrés, émet une vive lumière, mais ne brûle pas, puisqu'il est dans le vide. Néanmoins, à la longue, le filament de charbon s'altère, et l'intensité de la lumière fournie baisse notablement (de 20 pour 100); la vie d'une lampe ordinaire ne dépasse guère 600 heures, au bout desquelles on a avantage à la remplacer.

Les lampes actuellement en usage ont, en général, une intensité lumineuse de 16 bougies; toutefois, on en construit de beaucoup plus faibles (une bougie) et de plus puissantes (jusqu'à 200 bougies). Les lampes de 16 bougies sont établies pour fonctionner avec une différence de potentiel de 110 volts; elles ont environ 220 ohms de résistance *à chaud*, et, par suite, sont parcourues par un courant de 0,5 ampère; l'énergie absorbée est donc de $0,5 \times 110 = 55$ joules à peu près, par seconde, ce qui fait une puissance de 3,4 watts par bougie (**). Une faible partie de cette énergie,

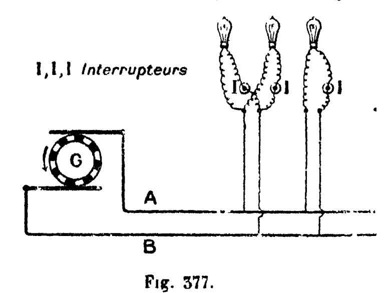


Fig. 377.

(*) Les deux fils communiquent avec deux petites plaques métalliques *a*, *a* (*fig* 376); la lampe s'agrafe, à baïonnette, sur une douille représentée en dessous, et dans laquelle les deux fils qui amènent le courant aboutissent à deux petites tiges, que des ressorts appuient contre les plaques *a*, *a*; il suffit de mettre la lampe en place sur la douille, pour que le courant passe

(**) Nous avons vu plus haut que la lampe à arc ne consomme que 0,75 watt par bougie, c'est-à-dire environ $\frac{1}{5}$ seulement de ce que consomme une lampe à incan-

3 à 4 pour 100 seulement, est transformée en énergie lumineuse, le reste apparaît sous forme de chaleur (*). — Actuellement, l'usage de lampes à filament métallique (osmium, tantale) se répand beaucoup. Elles sont d'un prix de revient notablement plus élevé que les lampes à filament de charbon, mais elles ont un meilleur rendement, ce qui rend, en somme, leur emploi économique.

La différence de potentiel aux bornes devant être constante, les lampes sont montées en dérivation (*fig.* 377). A et B sont des conducteurs isolés, entre lesquels les génératrices de l'usine maintiennent une différence fixe de potentiel, égale à 110 ou à 220 volts, suivant les installations; il est évident que, dans ce dernier cas, le type des lampes devra être différent de celui que nous avons indiqué plus haut.

370. *Chauffage électrique.* — Si l'on dispose des résistances de telle sorte que l'on y puisse consommer une quantité notable d'énergie par seconde, cette énergie sera *intégralement* transformée en chaleur, et pourra être utilisée pour le chauffage. Ce procédé de chauffage est donc celui qui donnerait le meilleur rendement; il présenterait, en outre, l'avantage de ne dégager aucun produit gazeux, et, par suite, d'être particulièrement hygiénique. Malheureusement le prix de revient de l'énergie électrique est, dans la plupart des cas, beaucoup trop élevé (**) pour que ce mode de chauffage puisse être employé d'une manière courante.

Les constructeurs se sont néanmoins ingéniés à établir des appareils de chauffage, dont le fonctionnement est d'ailleurs très satisfaisant. Les résistances employées sont constituées, soit par des fils métalliques, nus ou noyés dans du verre ou dans de la pâte à porcelaine, soit par de gros filaments de charbon, enfermés dans de grandes ampoules où l'on a fait le vide. On emploie également, et ce procédé semble avantageux, des résistances *métallocéramiques*, préparées en incorporant des poudres métalliques à une pâte céramique particulière; on obtient ainsi une substance de grande résistivité, et pouvant absorber et transformer en chaleur plus de 15 kilowatts par kilogramme de matière: on en confectionne des plaques, des tiges, que l'on place soit dans des ustensiles de cuisine, soit dans des poêles destinés au chauffage des appartements. On

descence; à intensité égale, l'éclairage par l'arc est donc notablement plus économique que l'éclairage par l'incandescence.

(*) Pour le montrer on plonge la lampe successivement, pendant le même temps (trois ou quatre minutes), dans un calorimètre opaque et dans un calorimètre transparent; le premier absorbe toute l'énergie rayonnée : le second, seulement l'énergie qui n'est pas à l'état de lumière.

(**) Pour produire une quantité de chaleur égale à celle que produit la combustion d'un kilogramme de charbon, il faudrait transformer en chaleur environ 9 kw-h, coûtant à Paris au minimum 5 francs, tandis que le prix du kilogramme de charbon ne dépasse pas 6 centimes.

peut prévoir que ces applications domestiques de l'électricité se développeront très vite, lorsque l'énergie électrique reviendra à un prix suffisamment bas.

Dans l'industrie, on a parfois besoin d'obtenir une température très élevée, supérieure à celle que les foyers à charbon permettent d'atteindre; on emploie alors l'arc électrique comme source de chaleur : l'appareil utilisé a pris le nom de *four électrique*.

371. ***Four électrique.*** — Le *four électrique* se compose d'une enceinte de charbon à l'intérieur de laquelle on fait jaillir un arc électrique, entre les pointes de deux grosses tiges de charbon disposées horizontalement (*fig.* 378). L'ensemble de l'appareil est enfermé

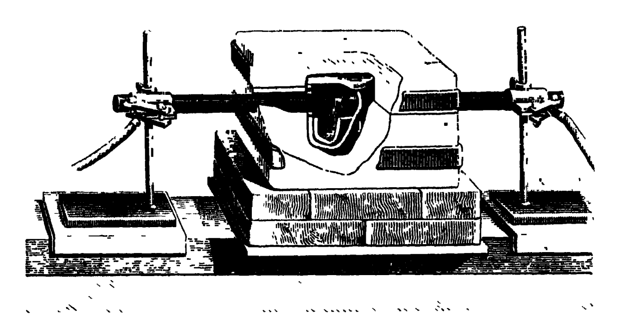


Fig. 378.

dans un bloc de pierre calcaire. A la température que l'on obtient ainsi, la silice est fondue et même volatilisée; un grand nombre de réactions chimiques deviennent réalisables. On a pu réduire, par le charbon, tous les oxydes métalliques irréductibles au feu de forge : oxydes de chrome, de manganèse, d'uranium. — La chaux elle-même est réduite, et le calcium mis en liberté se combine à l'excès de charbon et donne du carbure de calcium, employé à la fabrication de l'acétylène; la chute de potentiel d'un charbon à l'autre doit être d'environ 80 volts. Les effets sont d'autant plus puissants que le courant a une plus grande intensité (223) : on a employé, pour la fabrication du carbure de calcium, des courants ayant jusqu'à 10000 ampères d'intensité.

Depuis quelques années, les applications du four électrique se sont beaucoup développées; actuellement son emploi est courant pour la préparation de l'aluminium (376); il permet aussi d'obtenir facilement certaines fontes spéciales que le haut-fourneau ne donnerait qu'avec peine, ferrochrome, ferrotungstène, ferrovanadium; ces fontes sont utilisées dans la préparation de diverses sortes d'aciers : l'acier chromé servant à la fabrication des projectiles et des plaques

de blindage, les aciers au tungstène et au vanadium, employés surtout à la fabrication des outils, et qui possèdent la précieuse propriété de ne pas se détremper même au rouge sombre.

V. — Applications de l'électrolyse

372. ***Principales applications chimiques de l'énergie du courant électrique.*** — Le phénomène de l'électrolyse, dont nous avons indiqué plus haut les lois (239), sert de base à un assez grand nombre d'applications industrielles importantes. On peut les rapporter à trois branches principales : *la galvanoplastie*, *l'électrométallurgie* et *l'électrochimie* proprement dite, ou préparation des produits chimiques par électrolyse.

373. ***Galvanoplastie.*** — La *galvanoplastie* est l'art de déposer les métaux, en couches cohérentes, en les précipitant de leurs solutions salines par l'action d'un courant électrique.

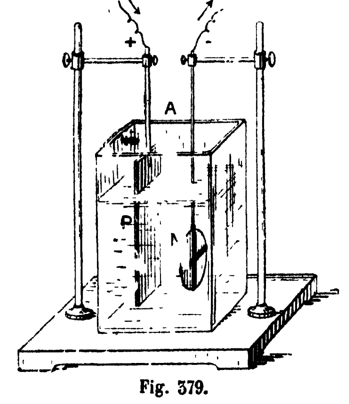


Fig. 379.

Supposons qu'il s'agisse de reproduire, par voie galvanique, l'une des faces d'une médaille. On commence par en prendre l'empreinte avec de la *gutta-percha*. Après avoir couvert cette empreinte d'une couche de plombagine, de manière à rendre la surface conductrice, on la plonge dans une solution de sulfate de cuivre, en N (*fig.* 379), à l'extrémité d'un fil communiquant avec le pôle négatif d'une pile. L'électrode positive est formée par une lame de cuivre P : c'est une *anode soluble* (240), qui abandonnera progres-

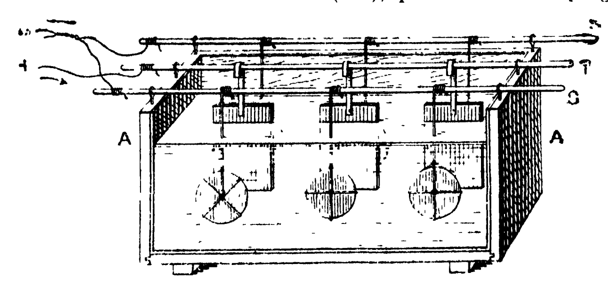


Fig. 380.

sivement au liquide une quantité de cuivre égale à celle qui se dépo

sera sur la cathode. — On arrête l'opération quand la couche de cuivre a acquis une épaisseur suffisante, et on la détache de l'empreinte.

Cette disposition, qui exige l'emploi d'un générateur extérieur à la cuve, a reçu le nom d'*appareil composé.*

La figure 380 représente une cuve A dans laquelle on peut reproduire galvaniquement plusieurs objets à la fois. A la tringle métallique T, qui communique avec le pôle positif de la pile, sont suspendues des lames de cuivre; les tringles S et S′, qui communiquent avec le pôle négatif, reçoivent les empreintes à recouvrir.

374. ***Appareil simple.*** — Voici une autre disposition, qui transforme l'appareil galvanoplastique lui-même en une véritable pile.

Dans une cuve contenant une solution de sulfate de cuivre (*fig.* 381), on place un ou plusieurs vases poreux, semblables à ceux

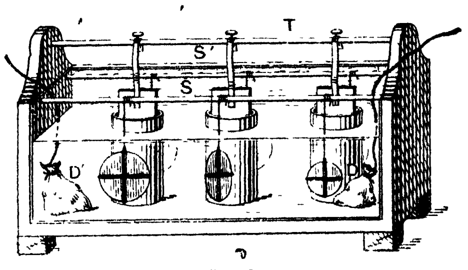


Fig. 381

de la pile de Daniell, et contenant chacun de l'eau acidulée et une lame de zinc amalgamé. Toutes ces lames communiquent avec une tringle métallique isolée T; d'autres tringles, S, S′, servent à suspendre les empreintes dans le sulfate de cuivre. — Cet ensemble représente une pile formée de plusieurs couples de Daniell, dont les lames de zinc sont à l'intérieur des vases poreux, et dont les lames de cuivre sont remplacées par les empreintes conductrices; dès que l'on fait communiquer par un conducteur la tringle T avec les tringles S, S′, le sulfate de cuivre est décomposé, et un dépôt de cuivre se produit sur chacune des empreintes. — L'appareil est généralement désigné sous le nom d'*appareil simple* (*).

375. ***Dorure, argenture, cuivrage, nickelage, etc.*** — La dorure ou l'argenture s'effectuent par des procédés semblables à celui qui a été décrit plus haut (373). — Les sels les plus convenables sont,

(*) A mesure que l'opération se poursuit, le bain tend à s'appauvrir en sulfate de cuivre, et à devenir de plus en plus acide. — Dans la figure 386, D et D′ sont deux petits sacs de toile contenant des cristaux de sulfate de cuivre, qui maintiennent la solution toujours saturée.

pour la dorure, le cyanure double d'or et de potassium ; pour l'argenture, le cyanure double d'argent et de potassium.

Supposons que la cuve A de la figure 380 contienne une solution de cyanure double d'argent et de potassium ; que la lame P soit une lame d'argent, et que N soit une médaille que l'on se propose d'argenter. Si P communique avec le pôle positif, N avec le pôle négatif d'une pile, le sel d'argent sera décomposé, et il se déposera de l'argent sur la médaille ; en même temps, l'électrode positive, se comportant comme une *anode soluble*, restituera progressivement à la liqueur l'argent qu'elle aura perdu (240).

La dorure s'effectue d'une manière semblable, avec cette différence que le bain de dorure doit être maintenu, pendant l'opération, à une température d'environ 70°.

En modifiant plus ou moins ces procédés, l'industrie est parvenue à déposer la plupart des métaux en couches cohérentes. — Pour préserver de la rouille les candélabres ou les statues de fonte qui ornent nos places publiques, on les revêt d'une couche *de cuivre*. — Pour préserver, de l'action oxydante de l'air, de menus objets de cuivre, de fer ou d'acier, on les couvre d'une couche *de nickel*, en employant comme électrolyte une solution de sulfate double de nickel et d'ammonium (*).

376. ***Électro-métallurgie.*** — On comprend sous ce nom l'ensemble des procédés qui permettent soit de préparer, soit de raffiner les métaux, en utilisant les phénomènes d'électrolyse. Les seules applications industrielles actuellement en vigueur sont le raffinage du cuivre et l'extraction de l'aluminium.

Raffinage du cuivre. — Cette opération a pour but d'obtenir du cuivre *pur*, en partant du cuivre impur du commerce. Le cuivre impur est employé comme anode soluble dans un bain de sulfate de cuivre, acidulé par l'acide sulfurique ; la cathode est une lame mince de cuivre pur. Les impuretés du cuivre tombent en boue au fond du bain. — Si l'on emploie comme cathode un mandrin cylindrique tournant en bois recouvert de plombagine, le dépôt de cuivre forme un tube : c'est ainsi que l'on fabrique les tubes de cuivre rouge sans soudure. — En raison de sa grande conductibilité électrique, le cuivre électrolytique est très recherché pour la construction des induits de dynamos.

Extraction de l'aluminium. — En soumettant à l'électrolyse de l'alumine dissoute dans de la cryolite(**), maintenue en fusion

(*) Pour la préparation des objets à recouvrir de dépôts métalliques et pour la composition des bains électrolytiques, on consultera avec fruit les ***Recettes de l'électricien***, par E. Hospitalier

(**) La cryolite est un fluorure double d'aluminium et de sodium $Al^2F^6,6NaF$, que l'on trouve au Groenland.

à la température du rouge vif, on obtient de l'oxygène à l'anode et de l'aluminium à la cathode. L'opération se fait dans un récipient en fer R (*fig.* 382), garni intérieurement d'un revêtement de charbon C qui sert de cathode; l'anode combustible est formée d'un gros cylindre de charbon A. Le courant à bas voltage (20 volts), mais dont l'intensité peut atteindre plusieurs milliers d'ampères, dégage assez de chaleur pour maintenir fondu le mélange de cryolite et d'alumine. L'aluminium liquide se rassemble à la partie inférieure du four, d'où on l'extrait par un trou de coulée T.

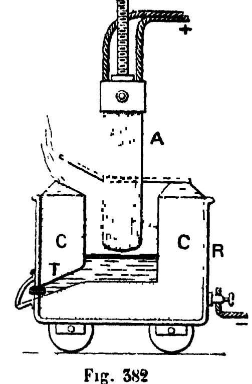


Fig. 382

Si l'on ajoute dans l'appareil une proportion déterminée de cuivre on obtient du bronze d'aluminium.

377. *Électrochimie*. — L'électrolyse et, d'une façon plus générale, l'énergie électrique est utilisée dans la préparation d'un certain nombre de produits chimiques; ce procédé de fabrication prend tous les jours une importance croissante, et semble destiné à jouer un grand rôle dans le développement de l'industrie chimique.

Comme exemples, nous signalerons la fabrication du chlore, des alcalis (potasse et soude), des chlorures décolorants, des chlorates; la préparation industrielle de l'hydrogène et de l'oxygène, de l'air ozonisé, des sels de baryum, etc.

Électrolyse des chlorures alcalins. Industrie du chlore et de la soude. — Si l'on électrolyse une solution étendue de sel marin, le sodium se porte à la cathode où il réagit sur l'eau de la solution, pour donner de la soude caustique et de l'hydrogène; à l'anode, en charbon ou en platine iridié, le chlore se dégage; on peut l'utiliser à la fabrication du chlorure de chaux. — Si l'on emploie une cuve électrolytique sans diaphragme et que l'on agite le liquide pendant l'opération, le chlore réagit sur la soude et donne l'hypochlorite de sodium ou eau de Javel.

Si l'on substitue, au chlorure de sodium, une solution concentrée de chlorure de potassium, et que l'on opère vers 60°, on obtient du chlorate de potassium.

Préparation de l'oxygène et de l'hydrogène. — Le liquide électrolytique est une solution de soude caustique, contenue dans une cuve séparée en deux compartiments par une cloison poreuse; les électrodes, en fer, plongent chacune dans l'un des compartiments de la cuve. L'hydrogène se dégage sur la cathode et l'oxygène sur l'anode.

CHAPITRE VIII

ÉLECTRICITÉ ATMOSPHÉRIQUE
PARATONNERRE

378. ***État électrique de l'atmosphère. — Variation du potentiel dans l'atmosphère.*** — Ce n'est pas seulement par les temps orageux que l'atmosphère est le siège de phénomènes électriques. Lorsque, par un temps pur et sec, on place dans l'atmosphère un conducteur quelconque, isolé et préalablement à l'état neutre, on peut constater qu'il s'électrise positivement à sa partie inférieure et négativement à sa partie supérieure.

Ce résultat s'explique, si l'on admet que dans l'atmosphère existe un champ électrique, dans lequel *les lignes de force sont dirigées de haut en bas*; ce qui revient à dire que la valeur du potentiel en chaque point augmente progressivement à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère (174).

Pour mesurer, à un instant déterminé, l'excès du potentiel en un point *a* de l'atmosphère sur celui du sol, on fait généralement usage de la méthode qui a été indiquée (175); mais, pour produire l'écoulement de l'électricité, on emploie, au lieu d'une pointe métallique, un mince filet d'eau s'écoulant à fines gouttelettes d'un vase isolé A (*fig.* 383), relié à l'aiguille d'un électromètre à quadrants. — On peut même enregistrer graphiquement les variations du potentiel, en faisant tomber sur le miroir vertical de l'électromètre un faisceau lumineux, dans une direction horizontale fixe, et recevant le faisceau réfléchi sur un papier photographique qui se déplace verticalement, d'un mouvement uniforme.

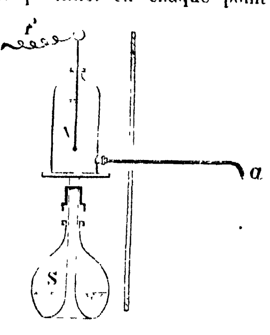


Fig 383.

Les recherches de ce genre montrent que, dans l'atmosphère, *les surfaces équipotentielles sont en général des plans horizontaux*, c'est-à-dire que *les lignes de force sont verticales et dirigées vers le sol.* — La variation du potentiel avec la hauteur au-dessus du sol est d'autant plus grande

que l'air est plus sec; elle est, en moyenne, d'environ 300 volts par mètre (*).

L'état électrique de l'atmosphère a peut-être pour origine des phénomènes qui se produisent dans les régions très élevées. — C'est dans ces hautes régions qu'on observe les *aurores boréales*. Ces splendides météores, particulièrement fréquents dans les contrées polaires, apparaissent sous la forme d'immenses arcs lumineux, dardant des rayons par leur partie inférieure ; ils présentent une couleur rouge ou violacée, qui rappelle celle des décharges électriques produites dans l'air très raréfié.

379. *État électrique des nuages. — Identité entre les phénomènes de la foudre et ceux de l'électricité.* — L'étincelle électrique qui jaillit d'une machine fortement chargée rappelle par sa forme sinueuse, les éclairs qui apparaissent pendant les orages. C'est à Franklin que revient le mérite d'avoir démontré qu'il y a réellement identité entre la foudre et les décharges électriques ; la foudre est due à l'électricité dont sont chargés *les nuages.*

En 1752, Franklin lança dans la plaine de Philadelphie un cerf-volant muni d'une pointe métallique, dans la direction de nuages orageux : la corde se terminait, à sa partie inférieure par un cordon de soie isolant. La corde de chanvre étant peu conductrice, on n'obtint d'abord que des traces douteuses d'électricité ; mais, une pluie fine étant venue rendre le chanvre plus conducteur, Franklin put tirer de la corde des étincelles de plusieurs pouces, il put allumer de l'alcool, charger des bouteilles de Leyde, etc.

On sait aujourd'hui que les nuages sont chargés tantôt d'électricité *positive*, tantôt d'électricité *négative*. C'est ce dont on peut se rendre compte, en ayant égard aux conditions diverses dans lesquelles ils se forment. — Un nuage peut être considéré comme une masse plus ou moins conductrice ; il doit s'électriser par influence, dans le champ électrique de l'atmosphère ; il présentera de l'électricité négative sur sa face supérieure, et de l'électricité positive sur sa face inférieure (160). Si la partie inférieure du nuage vient à se résoudre en pluie, ou si elle arrive momentanément en contact avec le flanc d'une montagne, il y aura déperdition d'électricité positive et le nuage restera chargé d'électricité *négative*. — Si le nuage, électrisé par influence, vient à se rompre par le milieu, il en résultera deux nuages, l'un *négatif*, l'autre *positif*. — Enfin un nuage chargé d'électricité positive ou négative peut produire par influence une charge de signe contraire, sur un autre nuage préalablement à l'état neutre, et qui sera mis momentanément en communication avec le sol.

380. *Foudre. — Éclairs. — Tonnerre.* — La *foudre* est une décharge qui éclate soit entre deux nuages, soit entre un nuage et la terre. L'*éclair* est le phénomène lumineux qui l'accompagne ; le *tonnerre* est le bruit de la décharge.

Les éclairs offrent l'aspect de traits de feu sinueux et souvent ramifiés (*fig.* 384), ils franchissent parfois des distances de 15 à 20 kilomètres (**). —

(*) Elle peut d'ailleurs atteindre des valeurs beaucoup plus élevées, même par temps clair. En plaçant un appareil à écoulement à une hauteur de 3 mètres, et le faisant communiquer avec un conducteur isolé placé près du sol, on a pu tirer de ce conducteur des étincelles de 3 millimètres de longueur, ce qui correspond à une différence de potentiel totale de 12000 volts, ou de 4000 volts par mètre.

(**) Pour s'expliquer la production de décharges s'effectuant à de pareilles distances, on remarquera que l'intervalle compris entre les nuages orageux est généralement occupé par un brouillard, formé de gouttelettes liquides flottant dans l'air : la décharge peut alors franchir une distance considérable, en passant d'une gouttelette à une autre.

Lorsque les décharges se produisent dans des régions très élevées de l'atmosphère, où la pression est très faible, on n'observe que des lueurs rougeâtres, éclairant une région limitée du ciel.

Le bruit du tonnerre ne nous arrive jamais que quelques secondes après la lumière de l'éclair : cet intervalle entre les deux perceptions tient à ce

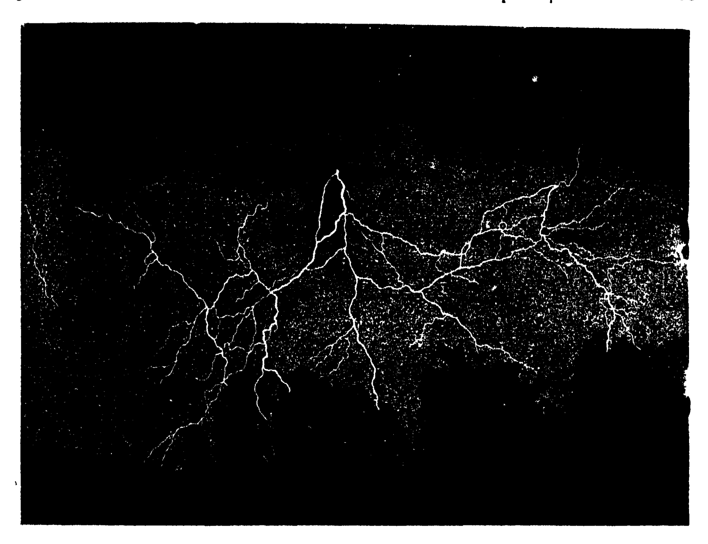


Fig 384.

que le son parcourt seulement 340 mètres environ par seconde, tandis que la lumière met un temps inappréciable à nous parvenir. On peut évaluer approximativement la distance qui nous sépare des nuages orageux, par le temps qui s'écoule entre l'apparition de l'éclair et le coup de tonnerre qui suit. — Le roulement du tonnerre est quelquefois dû aux échos produits par les objets situés à la surface de la terre, ou par les nuages eux-mêmes. Mais, dans la plupart des cas le roulement que nous entendons est dû à la production *simultanée* de plusieurs décharges, entre plusieurs nuages situés *à des distances différentes de l'observateur* : on conçoit alors que ces décharges simultanées soient perçues par l'oreille comme si elles étaient successives.

Lorsque la foudre éclate entre un nuage et le sol, on dit que *la foudre tombe*. Elle frappe de préférence les points qui offrent des saillies par rapport aux corps environnants : les clochers, les arbres isolés au milieu des plaines, etc. Aussi n'est-ce jamais dans le voisinage de ces abris qu'on doit se réfugier dans les temps d'orage.

Quant aux *effets de la foudre*, ils ne se distinguent de ceux des décharges de nos appareils que par leur grandeur. — Ce sont des effets *mécaniques*, brisant les pierres, ou déchirant en filaments le tronc des arbres; des effets *calorifiques*, fondant les fils de sonnettes ou volatilisant les dorures, et mettant le feu aux matières combustibles; des effets *chimiques*, donnant

lieu à la formation d'acide azotique dans les pluies d'orages; des effets *physiologiques*, amenant quelquefois les lésions les plus graves, et d'autres fois la mort sans lésion apparente.

Il peut arriver enfin que l'homme ou les animaux soient victimes de la foudre, sans en être directement frappés : c'est le phénomène qu'on a désigné sous le nom de *choc en retour*. — Supposons qu'un nuage chargé, par exemple, d'électricité positive, passe à une petite distance du sol : il agit par influence sur les corps conducteurs situés à la surface de la terre, attire l'électricité négative et repousse l'électricité positive du sol. Pendant que cette influence s'exerce, s'il arrive que le nuage se décharge sur un autre point, il y a retour subit à l'état neutre des corps qui étaient soumis à l'influence : de là, chez les animaux, une commotion qui peut déterminer la mort.

381. ***Paratonnerres.*** — C'est à Franklin qu'est due l'invention des *paratonnerres*, qui servent à préserver nos édifices de la foudre.

Voici une expérience qui permet de comprendre le rôle d'un paratonnerre, pendant un orage. — Prenons à la main une tige métallique, terminée en pointe, et approchons-la d'une machine électrique

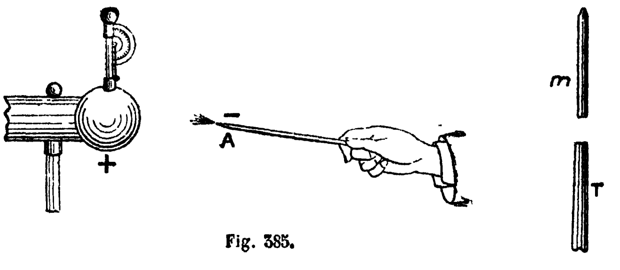


Fig. 385.

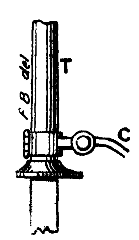


Fig. 386.

fournissant de l'électricité positive (*fig.* 385). Il ne jaillit *aucune étincelle* entre la machine et la tige : l'électricité négative, attirée par la machine, s'écoule progressivement par la pointe, et va neutraliser sans bruit l'électricité positive de la machine. Le corps de l'opérateur, armé de cette pointe, ne peut donc déterminer aucune décharge électrique, ni éprouver aucune commotion. — C'est ce *pouvoir des pointes* qui a conduit Franklin à l'emploi des paratonnerres. Quand un nuage chargé, par exemple, d'électricité positive, viendra passer au-dessus d'une pointe communiquant avec le sol, l'électricité négative affluera vers la pointe, qui la laissera échapper d'une manière continue. Ces corps conducteurs ne pouvant ainsi *conserver* aucune charge électrique, il ne pourra se produire aucune décharge entre eux et le nuage.

Un paratonnerre, tel qu'on le construit aujourd'hui, se compose d'une tige de fer TT (*fig.* 386), de 5 à 6 mètres de long, terminée

à sa partie supérieure par une pointe de cuivre doré *m* (*fig.* 387). La tige est mise en communication avec le sol par un *conducteur*, qui est tantôt une tige de fer, tantôt un câble de fil de fer. Le conducteur doit *communiquer avec toutes les pièces métalliques un peu volumineuses* de l'édifice, afin que l'électricité mise en mouvement dans ces pièces, par l'influence des nuages, puisse s'échapper par la pointe du paratonnerre. Si plusieurs paratonnerres sont installés sur un édifice, tous leurs conducteurs doivent communiquer entre eux par des tiges métalliques.

Fig. 387.

Pour établir une communication efficace entre l'extrémité inférieure du conducteur et le sol, on fait plonger cette extrémité dans l'eau d'un puits, où elle se ramifie en plusieurs branches terminées par des plaques de tôle (*fig.* 388). L'électricité repoussée par les nuages se perd ainsi par la nappe d'eau souterraine qui alimente le puits (*).

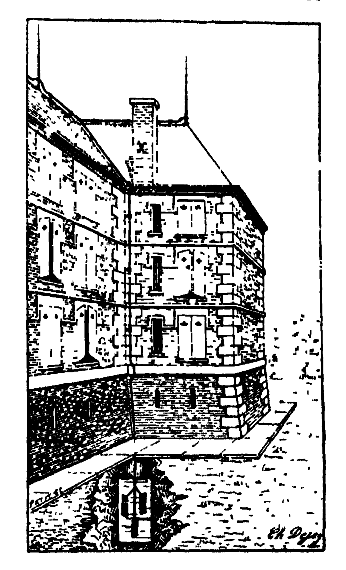


Fig. 388.

Mais le procédé à coup sûr le plus efficace consiste à enfermer l'édifice dans une véritable cage de Faraday (143) communiquant avec le sol. Ce système de paratonnerre a été appliqué pour la première fois à l'Hôtel de Ville de Bruxelles, sur les indications de Melsens. Il consiste en une sorte de réseau de fils métalliques, distribué sur la surface du monument et communiquant avec le sol. Sur le faîte sont placées, de distance en distance, des gerbes de petites pointes métalliques. Depuis l'installation de ce paratonnerre, les coups de foudre, autrefois fréquents, ne frappent plus l'édifice.

(*) Il ne faudrait pas se contenter de faire rendre l'extrémité du conducteur dans une citerne, dont les parois sont imperméables à l'eau; la braise de boulanger, dont on enveloppe quelquefois les ramifications des conducteurs, est également insuffisante. Un paratonnerre installé dans de semblables conditions serait plutôt dangereux qu'utile.

CHAPITRE IX

MAGNÉTISME TERRESTRE

I. — Mesure de la déclinaison et de l'inclinaison.

382. ***Champ magnétique terrestre.*** — Nous avons montré (285) qu'en chaque lieu de la Terre, il existe un champ magnétique uniforme : les éléments de ce champ (287) varient d'un point à un autre; de plus, en chaque point, ils varient avec le temps.

L'étude du magnétisme terrestre consiste à déterminer ces éléments en chaque point du globe. Nous bornerons cette étude à la mesure des angles qui définissent la direction et le sens du champ magnétique terrestre, la *déclinaison* et l'*inclinaison*.

383. ***Principe de la mesure de la déclinaison.*** — L'action magnétique de la Terre sur un aimant se réduisant à un couple, si l'on pouvait suspendre une aiguille aimantée par son centre de gravité, la ligne des pôles prendrait, en chaque lieu, une direction qui serait précisément celle des forces de ce couple, c'est-à-dire celle de la force magnétique du champ terrestre, direction constante au voisinage d'un même lieu. Dans la pratique, il serait assez difficile de réaliser un pareil mode de suspension; on détermine alors la direction des forces du couple terrestre, au moyen de deux aiguilles, assujetties chacune d'une manière particulière, comme nous allons l'indiquer.

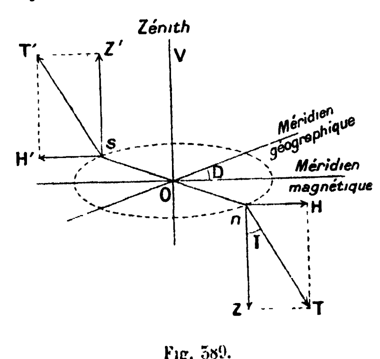


Fig. 389.

Soit, en premier lieu, un aimant *ns*, mobile *dans un plan horizontal* autour d'un axe vertical OV (*fig.* 389) et supposons cet aimant orienté d'abord d'une manière quelconque. Chacune des deux forces qui le sollicitent, la force T, par exemple, peut se décomposer en

deux autres, l'une Z verticale, l'autre H horizontale et située dans le même plan que T et Z. La force T′ se décomposera de même en deux autres Z′ et H′, qui seront respectivement égales et parallèles à Z et H, mais dirigées en sens contraire. En d'autres termes, le couple des forces T et T′ se décompose en un couple de forces verticales Z et Z′, et un couple de forces horizontales H et H′. — Les forces verticales Z et Z′, parallèles à l'axe OV, ne peuvent avoir d'autre effet que d'appuyer sur les supports de cet axe. Au contraire, les forces horizontales H et H′ doivent faire tourner l'aimant autour de cet axe, jusqu'à ce qu'il se place en équilibre dans leur direction; comme elles sont toujours dans le plan vertical qui contient la force T, c'est-à-dire dans le plan du *méridien magnétique* (286), on voit qu'une aiguille aimantée mobile autour d'un axe vertical prendra une position d'équilibre telle que son axe magnétique *ns* soit dans le plan du méridien magnétique : une telle aiguille s'appelle une *aiguille de déclinaison*.

La déclinaison a donc pour mesure l'angle plan que fait la direction nord de la ligne des pôles d'une aiguille aimantée, mobile dans un plan horizontal, avec la direction nord de la méridienne géographique du lieu. — La déclinaison d'un lieu est dite *orientale* ou *occidentale*, selon que le pôle nord de l'aiguille se place à l'est ou à l'ouest du méridien géographique.

L'appareil qui sert à la mesurer prend le nom de *boussole de déclinaison* et se compose en principe d'une aiguille de déclinaison mobile autour d'un axe vertical passant par le centre d'un cercle divisé horizontal (*fig.* 390).

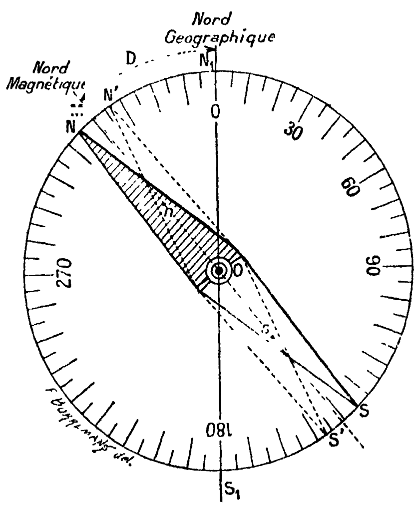


Fig. 390.

Supposons que l'on ait pu orienter le cercle divisé de telle sorte qu'un de ses diamètres, celui par exemple qui passe par le degré zéro, soit dirigé exactement suivant le méridien géographique N_1S_1 (*);

(*) En pratique, un théodolite, joint à l'appareil, permet d'effectuer cette opération par des observations astronomiques.

puisque l'aiguille se dirige vers le nord magnétique, il suffira, pour avoir la déclinaison, de lire l'angle N_1ON ; mais ceci suppose que l'axe magnétique de l'aiguille coïncide avec la ligne des pointes. Cette condition n'est jamais exactement remplie; voici comment on peut corriger l'erreur qui résulte de ce défaut de coïncidence.

Soit N_1S_1 (*fig.* 390) la méridienne géographique, et supposons que l'aiguille de la boussole se soit arrêtée dans une position d'équilibre NS; si les pôles *n* et *s* sont situés hors de la ligne des pointes, la valeur réelle de la déclinaison est exprimée par l'arc N_1M, compris entre la méridienne et la ligne des pôles; donc, dans ce cas, l'arc observé N_1N serait trop grand. — Enlevons l'aiguille de son pivot et retournons-la, de manière que la face qui se trouvait en dessus se trouve en dessous; la ligne des pointes, placée maintenant de l'autre côté de *ns*, se dirigera suivant N'S'; la lecture de l'arc N_1N' donnera donc alors une valeur trop petite. — Or, si l'on remarque que l'arc NM est égal à MN' ou, en d'autres termes, que chacun d'eux est la moitié de NN', on voit que la déclinaison D, mesurée par l'arc N_1M, s'obtiendra par la formule

$$D = \frac{N_1N + N_1N'}{2}.$$

Donc si, après le retournement, l'aiguille fait avec le méridien géographique un angle différent de celui qu'elle faisait d'abord, on obtient la déclinaison en prenant la moyenne de ces deux angles (*).

384. ***Principe de la mesure de l'inclinaison*** — Soit maintenant une autre aiguille aimantée, mobile dans *un plan vertical*, *autour d'un axe horizontal passant par son centre de gravité*. — Si l'on amène ce plan à coïncider avec le méridien magnétique, il contiendra les forces du couple terrestre T et T' (*fig.* 389) et, comme la pesanteur ne peut imprimer aucun mouvement à l'aiguille, la direction dans laquelle se fixera la ligne des pôles sera la *direction même du champ terrestre*.

L'angle que l'axe magnétique de cette aiguille fait avec le plan horizontal est précisément l'*inclinaison*, et une aiguille ainsi suspendue est une *aiguille d'inclinaison*.

L'appareil qui sert à mesurer l'inclinaison magnétique porte le nom de *boussole d'inclinaison* et se compose, en principe, d'une aiguille d'inclinaison NS mobile autour du centre d'un cercle divisé vertical (*fig.* 391). Supposons que l'on ait amené le plan du cercle à coïncider avec le plan du

(*) La figure 390 suppose que la ligne des pôles *ns* passe par le point de suspension O de l'aiguille. Cette condition n'est pas non plus toujours réalisée, mais il est facile de voir que la même formule convient encore au cas où la ligne des pôles ne passerait pas par le point de suspension. Il suffira, pour le démontrer, de faire la figure dans ce cas particulier.

méridien magnétique (*), et que le diamètre 0° — 180° du cercle soit horizontal ; il suffira, pour avoir l'inclinaison, de lire l'angle I que fait l'aiguille avec le diamètre horizontal.

Pour corriger les erreurs qui peuvent tenir à ce que la ligne des pôles ne coïnciderait pas exactement avec la ligne des pointes, on peut encore avoir recours à la méthode du retournement, comme il a été dit plus haut (383).

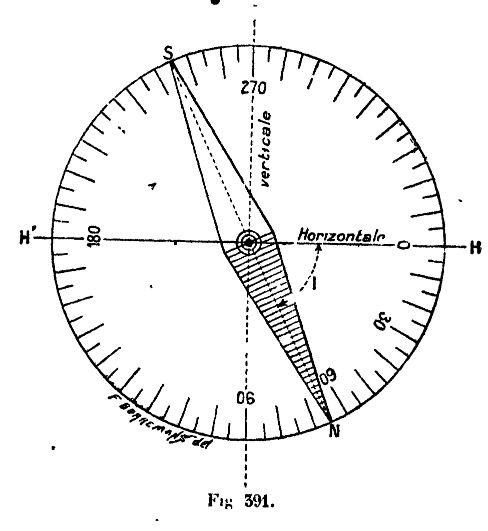


Fig. 391.

385. ***Boussoles usuelles.*** — La connaissance de la valeur de la *déclinaison*, dans chaque région du globe, permet d'employer l'aiguille aimantée pour s'orienter. — Les instruments qui servent à cet usage portent encore le nom de *boussoles*.

On construit de petites boussoles portatives, qui se composent simplement d'un cercle divisé, au centre duquel est une aiguille aimantée, mobile sur un pivot. Une boussole étant placée horizontalement, la pointe bleue de l'aiguille se dirige à peu près vers le nord. — Pour obtenir la direction nord-sud avec plus d'exactitude, il suffit de tenir compte de la déclinaison.

La *boussole d'arpentage* présente une disposition semblable. Elle

(*) Nous supposons connu le plan du méridien magnétique ; si l'on ne connaît pas ce plan, on peut le déterminer avec la boussole elle-même. — Supposons, en effet, que le plan du limbe soit placé *perpendiculairement au méridien magnétique* du lieu, c'est-à-dire que l'axe horizontal de rotation de l'aiguille soit situé dans ce plan : les forces du couple terrestre étant dans le plan du méridien magnétique, chacune d'elles pourra être décomposée en deux autres forces dirigées dans ce plan, l'une horizontalement, l'autre verticalement. Le couple terrestre est ainsi remplacé par deux autres : l'un, ayant ses forces horizontales parallèles à l'axe de rotation, ne peut imprimer à l'aiguille aucun mouvement ; l'autre, ayant ses forces verticales, c'est-à-dire perpendiculaires à l'axe de rotation, amènera l'aiguille dans une position verticale. — Donc, pour orienter le limbe dans le méridien magnétique, on pourra lui donner d'abord, par tâtonnements, une orientation telle que l'aiguille s'arrête *dans une position verticale*, il suffira de faire tourner ensuite le limbe de 90 degrés, pour qu'il arrive à coïncider avec le plan du méridien magnétique.

sert à orienter, sur un plan ou sur une carte, les contours des terrains, les sinuosités des routes ou des rivières, etc.

386. *Boussole marine.* — C'est surtout en mer que la boussole est indispensable, pour maintenir le navire dans la direction qu'il doit suivre.

La *boussole marine* ou *compas* (*fig.* 392) se compose essentiellement d'une aiguille de déclinaison, fixée sur une lame circulaire horizontale de mica qui repose par une chape sur un pivot : cette lame porte, marqués sur sa surface, les degrés de la circonférence et la rose des vents. Une *suspension de Cardan* permet au pivot de se placer toujours verticalement, malgré les oscillations du navire. — La boussole est installée à l'arrière du navire, sous les yeux du timonier chargé de la manœuvre du gouvernail, de manière à lui permettre de comparer, à chaque instant, la direction de l'aiguille avec celle du navire Pour faciliter cette comparaison, la boîte de la boussole porte une ligne fixe figurée par une tige de cuivre LL′ placée dans la direction de l'axe du navire : c'est la *ligne de foi*. Pourvu que l'on connaisse approximativement la position géographique du point où l'on se trouve, on sait, par cela même, quel angle fait la ligne nord-sud avec la route à suivre; par suite, en tenant compte de la déclinaison en ce point, on sait quel angle doit faire l'aiguille aimantée avec la direction du navire, c'est-à-dire avec la ligne de foi. Si le navire n'est pas exactement dans la direction de la route à suivre, on est averti par l'observation de la boussole, et on l'y ramène au moyen du gouvernail.

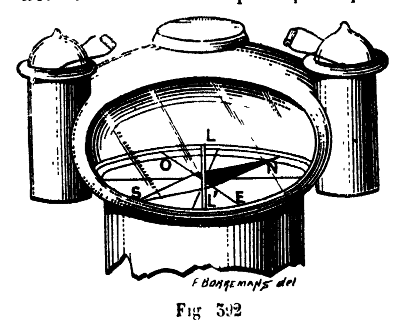


Fig 392

État magnétique du Globe terrestre.

387. *Variations de la déclinaison et de l'inclinaison, en un même lieu.* — La *déclinaison*, en un même lieu, est soumise à des variations, dont les unes sont régulières les autres, accidentelles.

Pendant l'intervalle d'une même journée, dans nos régions, l'extrémité nord de l'aiguille de déclinaison marche de quelques minutes vers l'ouest pendant la matinée, et jusqu'à l'heure du maximum de

température; elle revient ensuite sur elle-même, pour reprendre une marche semblable le jour suivant, et ainsi de suite. Ce sont les *variations diurnes*; elles sont plus grandes pendant la saison chaude que pendant l'hiver. — Dans les observations météorologiques, on peut obtenir, par la photographie, une inscription graphique continue de ces variations, en installant un miroir sur l'axe de rotation de l'aiguille, et procédant comme nous l'avons indiqué pour l'étude des variations du potentiel de l'air (378).

La déclinaison moyenne de l'année éprouve également des variations, qui ont reçu le nom de *variations séculaires*. Les observations faites à Paris, depuis l'année 1580, ont conduit aux résultats suivants. — En 1580, la déclinaison était orientale et égale à 11°30′; elle a été en diminuant jusqu'en 1663, où elle est devenue nulle, puis occidentale, et l'aiguille a continué à marcher dans le même sens jusqu'en 1814. En 1814, la déclinaison occidentale a atteint un maximum égal à 22°35′, et elle a ensuite commencé à décroître. — En janvier 1912, la déclinaison moyenne, toujours occidentale, était de 13°50′; elle décroît actuellement d'environ 4′ par an.

Pour l'*inclinaison*, les premières observations à Paris, remontent à une époque moins reculée que celles de la déclinaison En 1761, l'inclinaison à Paris était d'environ 75°, elle a été en décroissant depuis cette époque; sa valeur en janvier 1912 était de 64°32′, c'est à dire que, dans un intervalle de plus de deux cents ans, elle n a diminué que d'environ 10°. — Par conséquent, tout ce qu'on peut dire jusqu'ici, c'est que les variations de l'inclinaison ont été beaucoup plus lentes que celles de la déclinaison Mais il n'est pas impossible que ces deux éléments du magnétisme terrestre soient soumis à une période d'oscillation *de même durée*, c'est une question sur laquelle il ne sera possible de se prononcer que lorsque ces quantités auront passé, toutes deux, par des maxima et par des minima.

Enfin, on a donné le nom de *variations accidentelles*, ou *orages magnétiques*, à de véritables perturbations, survenant brusquement dans les mouvements de l'aiguille aimantée, et ne durant, en général, que quelques heures. — Arago a remarqué qu'elles coïncident généralement avec l'apparition d'aurores boréales, soit en des points voisins, soit en des points éloignés. — Des observations suivies, faites en des points distribués sur toute la surface du globe, ont montré d'ailleurs que les orages magnétiques apparaissent simultanément, avec des intensités diverses, en des points extrêmement éloignés les uns des autres : ils ne peuvent donc être attribués qu'à des phénomènes s'accomplissant à une très grande distance de la surface du globe. La fréquence de ces orages magnétiques paraît liée à la fréquence des taches sur la surface du Soleil, et présente un maximum à peu près tous les onze ans.

388. ***Variations de la déclinaison et de l'inclinaison magnétiques***

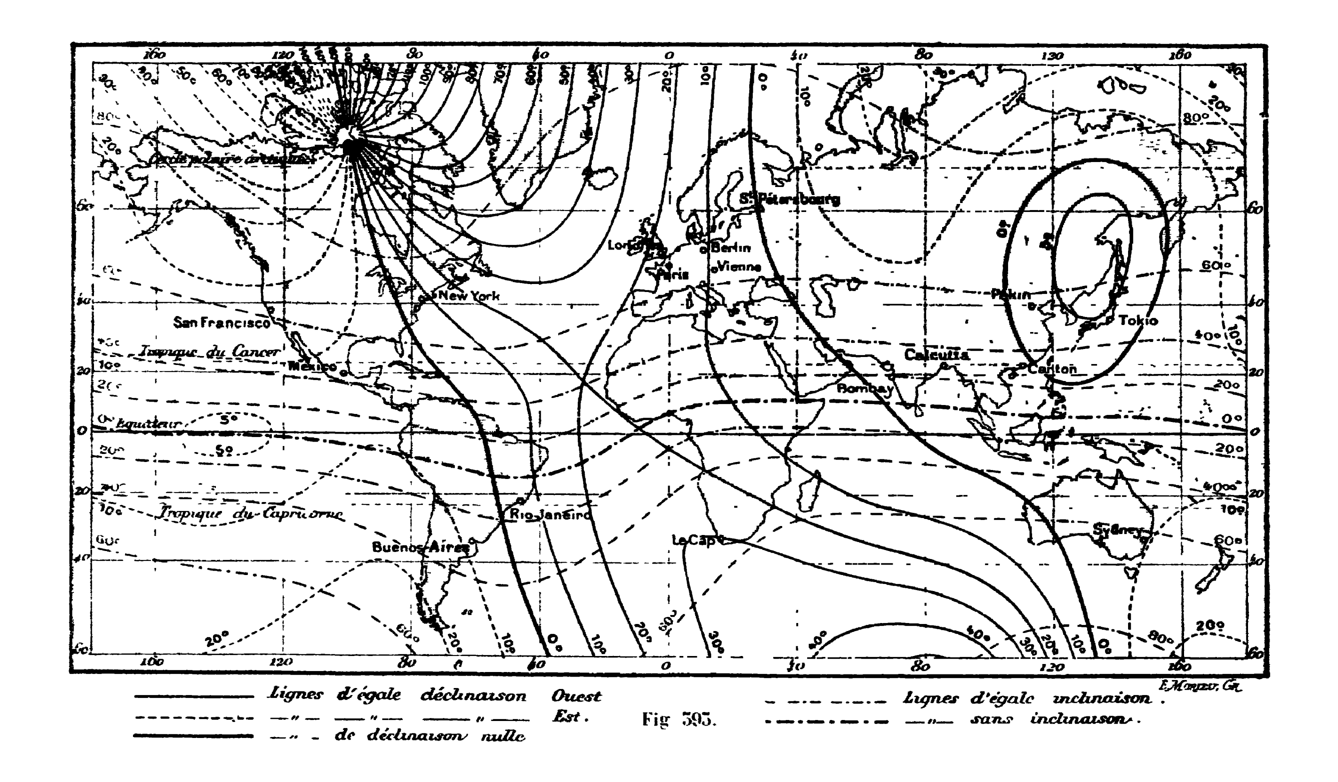

San Francisco
New York
Mexico
Tropique du Cancer
Équateur
Tropique du Capricorne
Rio Janeiro
Buenos Aires
Londres
Paris
Berlin
Vienne
St Pétersbourg
Le Cap
Bombay
Calcutta
Pékin
Canton
Tokio
Sydney
Cercle polaire arctique
E. Morieu, Gr.
Lignes d'égale déclinaison Ouest
" " " Est.
" de déclinaison nulle
Lignes d'égale inclinaison.
" sans inclinaison.

Fig 393.

à la surface du globe. — Cartes magnétiques. — Puisque la déclinaison et l'inclinaison n'éprouvent, en un même lieu, pendant le cours d'une année, que des variations de quelques minutes, on comprend que l'on puisse exprimer, par des Tables numériques ou par des Cartes, l'état magnétique du globe *à une époque déterminée.* — Voici, à ce sujet, quelques résultats généraux.

Déclinaison. — La déclinaison a des valeurs très différentes d'un point à l'autre du globe. — Si l'on joint entre eux, sur un planisphère, les points pour lesquels la déclinaison a la même valeur, à un instant donné, on obtient un réseau de lignes appelées *lignes isogones*, ou *lignes d'égale déclinaison.* La figure 393 représente la forme générale de ces lignes, en 1885, et donne, à cette époque, la valeur de la déclinaison aux différents lieux.

Ces lignes vont, en général, converger aux pôles géographiques, et aussi en deux points qui ne sont pas diamétralement opposés; ces points, situés au voisinage des pôles géographiques, sont les *pôles magnétiques de la Terre*; leurs coordonnées, sont pour le pôle nord magnétique, 97° de longitude ouest et 70° de latitude nord, et pour le pôle sud magnétique, 147° de longitude est et 73° de latitude sud. — En ces points, la déclinaison est indéterminée; les forces du couple terrestre y sont verticales, et par suite ne peuvent donner aucune orientation à une aiguille de déclinaison. La déclinaison est également indéterminée aux pôles géographiques, car l'une des deux directions, qui déterminent la déclinaison, celle du méridien géographique, est elle-même indéterminée.

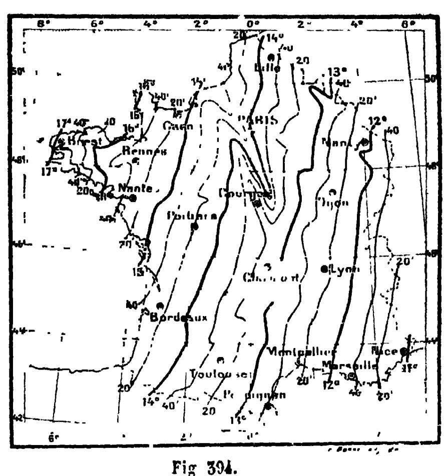


Fig 394.

On remarquera, en particulier, l'existence de deux lignes fermées, le long desquelles la declinaison est nulle. L'une d'elles, la plus importante, celle qui passe près de Saint-Pétersbourg et de New-York, passe également par les pôles magnétiques. — L'autre enveloppe le Japon.

Les lignes isogones se déplacent à la surface de la Terre en se défor-

mant lentement, par suite des variations séculaires de la déclinaison.

Si l'on fait des mesures de déclinaison en des points de plus en plus rapprochés, on découvre des irrégularités singulières dans la forme des lignes isogones Un exemple remarquable de ces anomalies est précisément celle qui affecte les éléments magnétiques dans le bassin de Paris, et dont la figure 394 (*) montre l'importance en ce qui concerne la déclinaison. — De pareilles anomalies, probablement dues à la constitution du sol, se retrouvent sans doute dans bien d'autres régions du globe, où des recherches précises n'ont pas encore pu être effectuées.

Inclinaison. — Les lignes *d'égale inclinaison*, ou lignes *isoclines*, donnent lieu à des remarques analogues à celles que nous venons de faire sur les lignes d'égale déclinaison. — Elles sont également représentées dans la figure 393.

Si l'on examine cette figure on y remarque, en particulier, l'existence d'une ligne sans inclinaison, dont le trajet ne s'écarte pas notablement de l'équateur terrestre; le long de cette ligne, l'aiguille d'inclinaison se tient horizontale.

Pour les régions de la Terre situées au nord de cette ligne, c'est le pôle nord de l'aiguille d'inclinaison qui plonge sous l'horizon; l'inclinaison croît d'ailleurs à mesure que l'on se rapproche du pôle nord magnétique, où elle est égale à 90° l'aiguille est alors verticale — Au sud de la ligne sans inclinaison, c'est au contraire le pôle sud de l'aiguille qui s'incline au-dessous de l'horizon; l'inclinaison en un point est d'autant plus grande que ce point est plus rapproché du pôle sud magnétique : là encore, l'aiguille d'inclinaison se tient verticale.

(*) Cette figure représente les lignes d'égale déclinaison, en France, au 1er janvier 1911.

PROBLÈMES

OPTIQUE

I. — Propagation rectiligne et vitesse de la lumière.

1 Calculer 1° la longueur du cône d'ombre que projette la Lune éclairée par le Soleil; 2° le diamètre du cercle intercepté dans ce cône d'ombre par la surface terrestre, lorsque la distance de la Lune à la Terre est minimum (zone de totalité de l'éclipse); 3° le rapport du diamètre apparent de la portion éclipsée du Soleil au diamètre apparent total du Soleil, lorsque la Lune est à sa distance maximum de la Terre, cas où le cône d'ombre n'est plus coupé par la surface terrestre (éclipse annulaire). L'observateur est supposé placé à la surface de la Terre, sur la ligne droite qui joint les centres des trois astres.

Distance de la Terre au Soleil · 150 000 000 km.

Distance de la Lune à la Terre, comprise entre 360 000 et 400 000 km

Diamètre de la Lune 3480 km.

Diamètre du Soleil 1 394 000 km

2. Dans une mesure de la vitesse de la lumière par la méthode de Fizeau, on emploie une roue dentée de 500 dents, chaque dent étant de largeur égale à l'intervalle vide qui sépare deux dents consécutives. Le miroir réflecteur étant situé à 6 km de la roue, on demande le nombre de tours que la roue doit faire par seconde pour qu'on ait l'extinction de l'image donnée par le faisceau lumineux réfléchi. Ce problème comporte-t-il plusieurs solutions?

Dans une deuxième expérience, le miroir réflecteur est situé à 10 km : quelle doit être la vitesse de la roue pour l'extinction?

Dans une troisième expérience, une partie du faisceau se réfléchit à 6 km, l'autre à 10 km. Toutes deux sont réfléchies normalement et concourent à donner une image de retour. Quelle vitesse faut-il donner à la roue pour éteindre à la fois les images de retour provenant de ces deux faisceaux réfléchis? (*Clermont*, 1909.)

II. — Photométrie.

3. Une lampe et une bougie sont distantes de 4,15 m; leurs intensités sont dans le rapport de 6 à 1. A quelle distance de la bougie doit-on placer un écran perpendiculaire aux rayons, sur la ligne qui joint les deux sources de lumière, pour qu'il soit également éclairé? (*Paris*, 1902.)

4. Une feuille de papier est éclairée normalement par deux bougies égales, placées l'une à 1 m et l'autre à 2 m de la feuille. On déplace la première et on l'amène à une distance x ; à quelle distance y faut-il amener l'autre bougie pour que l'éclairement reste le même ?

5. Pour impressionner le papier au gélatino-bromure, les photographes emploient indifféremment la flamme d'une bougie, une lampe à pétrole ou un bec papillon placés respectivement à des distances du châssis égales à 0,18 m, 0,45 m et 1 mètre. Évaluer en bougies ordinaires les intensités de la lampe et du bec de gaz.

6. Dans un photomètre de Foucault les deux moitiés de la lame translucide L_1L_2 (fig. 1) sont respectivement éclairées par les deux sources F_1, F_2. L'éclairement de L_1 et de L_2 est le même lorsqu'on a

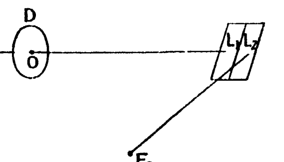


Fig. 1.

$$L_1F_1 = 40 \text{ cm} \quad \text{et} \quad L_2F_2 = 20 \text{ cm}.$$

1° Quel est le rapport de l'intensité des deux sources lumineuses ?

2° Sur le faisceau L_1F_1, on intercale, en D, un disque circulaire formé alternativement de secteurs opaques et de secteurs transparents. Ce disque, perpendiculaire à F_1L_1, a son centre en O et peut recevoir un mouvement très rapide de rotation autour de l'axe F_1L_1, de telle sorte que L_1 reste toujours uniformément éclairée. On demande ce qu'il faudra faire pour rétablir l'égalité d'éclairement en L_1 et L_2 en supposant :

a) Que l'angle de tous les secteurs opaques est de 15° et celui de tous les secteurs transparents de 75° ;

b) Que l'on fait varier régulièrement de 360° à 0° la somme des angles des secteurs transparents (*Clermont*, 1908.)

7. Un faisceau lumineux cylindrique homogène tombe normalement sur un écran, et y produit un éclairement e : montrer que si les rayons du faisceau tombent sur l'écran en faisant avec la normale à l'écran un angle i (angle d'incidence), l'éclairement e' a pour valeur $e' = e \cos i$.

Montrer qu'il en est de même pour un faisceau conique d'ouverture infiniment petite, si les deux écrans sont à la même distance du sommet du faisceau.

8. Deux points lumineux A et B, de même intensité lumineuse, éclairent une très petite surface S. Ces points peuvent se déplacer sur deux droites SA et SB également inclinées sur la surface S. Établir la relation qui doit exister entre les distances $SA = x$ et $SB = y$ pour que la petite surface considérée conserve un éclairement constant. (*Constantine*, 1897.)

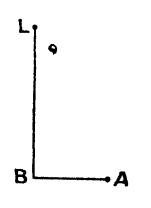


Fig. 2.

9. Une source lumineuse L (*fig.* 2) d'intensité égale à 20 bougies est placée au centre du toit d'un wagon de chemin de fer. Calculer l'éclairement d'un livre tenu horizontalement en A par un voyageur assis au milieu de la banquette, sachant que le livre A est à 0,50 m de la verticale LB de la source et que la distance BL est égale à 1 m.

10. Une très petite surface A (*fig.* 3) d'une table horizontale est éclairée par un point lumineux O situé sur la verticale BZ. Quelle doit être la position du point O pour que l'éclairement de A soit maximum?

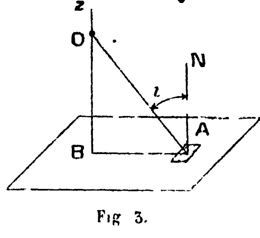


Fig 3.

11. On a un bec Auer qui, sur un mur placé à 7,50 m du bec, produit le même éclairement qu'une lampe à incandescence de 16 bougies quand elle est placée à 4 m du même mur. Quel est le pouvoir éclairant de ce bec Auer? — Une avenue est éclairée par une série de lanternes contenant chacune un bec Auer semblable au précédent; la distance de deux lanternes consécutives est de 20 m et la hauteur de chaque lanterne au-dessus du sol est de 4 m. On demande quel est l'éclairement sur le sol au point le moins éclairé de la ligne des lanternes, c'est-à-dire au point situé entre deux lanternes consécutives à égale distance de chacune d'elles. On ne tiendra compte pour calculer l'éclairement de ce point que de l'effet des deux lanternes les plus voisines. On évaluera l'éclairement en prenant pour unité celui que donne une bougie à une distance de 1 m sur un écran normal aux rayons lumineux (*Clermont*, 1903.)

12. Aux trois sommets d'un triangle équilatéral sont placés des points lumineux identiques. Au centre du triangle se trouve un très petit écran. Montrer que les deux faces de l'écran sont également éclairées, et cela, quelle que soit l'orientation de l'écran.

Établir le même théorème pour un polygone régulier quelconque.

13. Une petite surface horizontale S (*fig.* 4) émet de la lumière (c'est, par exemple, une petite portion de la surface d'un métal en fusion). On considère la lumière reçue sur un petit écran S'. L'écran est une petite surface plane, qu'on maintient horizontale et tournée vers le bas, de façon à regarder la surface lumineuse S. On place d'abord l'écran S' de façon que son centre M' soit sur la même verticale que le centre M de S. Dans ces conditions, on a un éclairement E sur l'écran pour MM' $= d = 2$ m. On déplace ensuite S' en S'' de manière que MM'' fasse avec la verticale un angle i. Que doit être la distance MM'' si l'on veut que l'éclairement sur S'' soit toujours égal à E? Calculer la distance MM'' qui satisfait à cette condition : 1° pour $i = 30^0$, 2° pour $i = 45^0$.

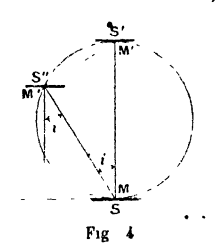


Fig 4

Enfin si l'on fait varier i avec la condition de maintenir constant l'éclairement E, quel est le lieu de M''? On admettra qu'une petite surface plane s émet, dans une direction faisant un angle α avec la normale à cette surface, une quantité de lumière proportionnelle à cos α. (*Dijon*, 1897.)

III. — Réflexion. — Miroirs plans et sphériques.

14. Grandeur minimum et distance au sol d'un miroir plan vertical tel qu'une personne se tenant debout devant le miroir s'y voie tout entière

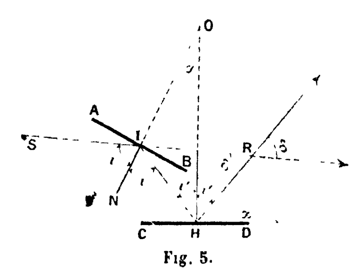


Fig. 5.

15. Deux miroirs plans AB et CD (*fig.* 5), inclinés l'un sur l'autre, ont leurs faces réfléchissantes en regard, un rayon lumineux SI se réfléchit, dans le même plan d'incidence, d'abord sur AB, suivant IH; puis sur CD, suivant HR. Démontrer que l'angle δ, formé par la direction du rayon incident avec celle du rayon deux fois réfléchi, est toujours double de l'angle α des deux miroirs.

16. Un rayon lumineux provenant d'un point fixe P (*fig.* 6) traverse une glace à faces parallèles G, placée près de la source et inclinée à 45 degrés sur la direction du rayon; il se réfléchit sur un miroir plan *m* qui est situé au centre C d'un miroir concave M; le rayon suit donc le trajet PCICHQ, subissant, au retour, la réflexion sur la glace à faces parallèles; on le reçoit sur un écran E situé à une distance HQ = HP. On imprime alors au miroir plan *m* un rapide mouvement de rotation, autour d'un axe perpendiculaire au plan de la figure, passant par le centre C du miroir concave et situé dans le plan du miroir *m*; on constate que le point Q, où le rayon réfléchi vient rencontrer l'écran, s'est déplacé en Q′. Connaissant le rayon R du miroir concave, la distance PC = D, la durée T d'une rotation complète du miroir et le déplacement $d = QQ'$, calculer la vitesse de la lumière (Méthode de Foucault pour mesurer la vitesse de la lumière.)

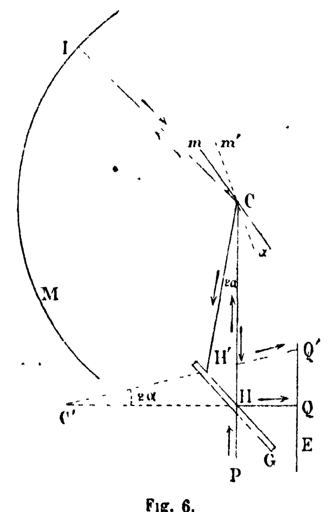


Fig. 6.

17. Si un rayon se réfléchit successivement un nombre quelconque de fois sur deux miroirs plans, le rayon incident et le rayon final font des angles égaux avec l'arête du dièdre formé par les deux miroirs.

18. Trois miroirs plans forment un trièdre trirectangle; un rayon lumineux se réfléchit successivement sur les trois miroirs : montrer que le rayon trois fois réfléchi est parallèle au rayon incident.

19. Un tube assez long (canon de fusil) en métal poli intérieurement, fermé à un bout par un disque percé d'un trou centré sur le tube est dirigé vers une surface éclairée; en regardant par l'autre bout, on voit une série d'anneaux brillants : expliquer leur production.

20. Un miroir sphérique concave dont l'axe passe par le centre du Soleil donne de cet astre une image réelle de 2 cm de diamètre. Quel est le rayon de ce miroir?

Diamètre apparent du soleil : $\frac{1}{2}$ degré. On confondra la tangente avec l'angle. (*Alger*, 1909.)

21. L'axe principal d'un miroir sphérique concave de 5 m de rayon et de 1 m d'ouverture est dirigé vers le centre du Soleil.

1° On demande où se fera l'image du Soleil et quelle sera sa grandeur. Diamètre apparent du Soleil $= 32'$.

2° On reçoit l'image du Soleil sur la face noircie d'une boîte en cuivre pesant 100 g, contenant 500 g d'eau à 0°. On demande au bout de combien de temps l'eau commencera a entrer en ébullition, sachant que le Soleil envoie par minute une quantité de chaleur égale à 2 calories sur une surface de 1 centimètre carré normale aux rayons.

On supposera que le miroir renvoie les 0,8 de la quantité de chaleur reçue et que la chaleur spécifique du cuivre est de 0,09. (*Besançon*, 1902.)

22. Calculer la distance $z = \overline{PP'}$ qui sépare un point P de son image P', dans un miroir sphérique de rayon donné — Étudier comment le segment z varie avec la distance $x = \overline{SP}$ du sommet du miroir au point P. Construire la courbe $z = f(x)$.

23. Où faut-il placer un objet devant un miroir sphérique de rayon R, pour que l'image soit m fois plus grande que l'objet? Discussion.

24. Dans le plan focal d'un miroir sphérique concave de 1 m de distance focale on place une petite source lumineuse qui a la forme d'un cercle de 1 cm de diamètre. Le miroir fournit un faisceau réfléchi que l'on reçoit sur un écran parallèle au plan focal situé à 500 m du miroir.

Calculer le diamètre de la trace du faisceau sur l'écran. On négligera les dimensions du miroir.

25. Un miroir concave a 60 cm de rayon. En avant de ce miroir est placé un objet lumineux de forme rectangulaire ABED (*fig.* 7) dont le côté AB est dirigé suivant l'axe du miroir.

On donne SA $= 90$ cm AB $= 30$ cm AE $=$ BD $= 6$ cm.

On demande : 1° De construire l'image de cet objet;

2° De définir la position, la forme et les dimensions de cette image;

3° De calculer la surface de cette image et de la comparer à celle de l'objet.

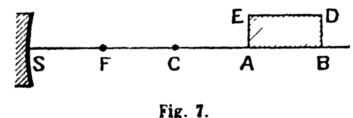


Fig. 7.

26. Un miroir sphérique concave de laiton est disposé de façon que son axe principal OX soit horizontal; ce miroir peut être, par un moyen quelconque, porté à des températures différentes, son sommet O restant fixe. Un

point réel A est placé sur OX à une distance invariable p du sommet du miroir. Étant au delà du foyer, A donne une image réelle. Soit A' la position de cette image lorsque le miroir est à 0°, et A'' la nouvelle position lorsque le miroir est à une température $+t°$. On mesure le déplacement $A'A'' = \delta$ de cette image. Déduire la température t, le déplacement δ étant considéré comme positif lorsque A'' s'éloigne du miroir, et comme négatif lorsqu'il se rapproche. Que faut-il pour que δ soit toujours positif? Discuter les conditions de possibilité et montrer que le dispositif précédent constitue bien un thermoscope extrêmement sensible.

Application numérique : la distance focale à 0° étant $f_0 = 50$ cm et le coefficient de dilatation linéaire du laiton étant 0,00002, calculer le déplacement δ lorsque le miroir est porté à $t = 100°$, dans l'hypothèse $p = 51$ cm.

(*Toulouse*, 1902.)

27. Deux miroirs sphériques concaves, égaux, de distance focale f, sont placés à une distance d l'un de l'autre, les surfaces concaves en regard et ayant même axe principal. Dans quel plan faut-il placer un objet lumineux pour que les rayons réfléchis par un miroir, puis par l'autre, forment une image en ce même plan? Calculer le rapport de grandeur de l'image à l'objet.

Application : $d = 1$ m; $f = 0,10$ m. (*Nice*, 1903.)

28. On a deux miroirs concaves, de même distance focale, f, dont les axes principaux coïncident et qui tournent leurs concavités l'un vers l'autre. Leurs sommets sont à une distance d.

Trouver la position que doit occuper un point situé sur l'axe commun des miroirs pour que ses deux images, données par chacun des miroirs, coïncident.

Application numérique $d = 40$ cm, $f = 75$ cm. (*Montpellier*, 1906.)

29. Deux miroirs concaves MN et M'N' (*fig.* 8), dont les rayons sont respectivement de 1 m et de 1,50 m. sont disposés en regard l'un de l'autre, de manière que leurs axes coïncident. La distance OO' est de 3 m. En quel point de l'axe commun devra-t-on placer un objet lumineux AB, pour que les images réelles de cet objet données par les deux miroirs soient égales?

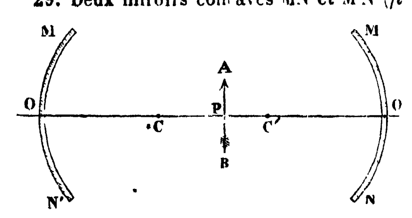


Fig. 8.

30. Deux miroirs concaves M et M' de rayons $R = 20$ cm, et $R' = 30$ cm sont placés face à face à 60 cm l'un de l'autre; leurs axes principaux coïncident. Trouver en quel point F, viendront converger des rayons parallèles à l'axe qui, tombant d'abord sur le miroir M, se réfléchissent, puis rencontrent le miroir M' sur lequel ils se réfléchissent de nouveau.

Trouver ensuite en quel point F' de l'axe principal, il faudrait placer un point lumineux pour que les rayons qu'il émet soient parallèles à l'axe après s'être réfléchis d'abord sur M, puis sur M'.

IV. — Réfraction. — Prismes.

31. Un petit objet lumineux monochromatique est à 25 cm de l'œil d'un observateur; on interpose entre l'œil et l'objet une lame à faces parallèles de 10 cm d'épaisseur et d'indice 4/3 (une cuve à faces parallèles pleine d'eau); trouver de combien semble s'être deplacé l'objet. On supposera que les rayons sont sensiblement normaux à la lame.

32. Quand on emploie des plaques photographiques autochromes Lumière (page 155) dans un appareil à foyer fixe, la surface sensible se trouve portée en arrière du plan de mise au point de toute l'épaisseur de la plaque de verre qui porte la couche sensible. On remédie à cet inconvénient en plaçant en arrière de l'objectif l'écran compensateur qui agit, au point de vue de la formation des images, comme une lame de verre à faces parallèles. Quelle doit être l'épaisseur de cet écran pour que l'image, primitivement formée sur le plan avant de la plaque sensible, soit reportée, après interposition de l'écran, sur la face arrière?

La plaque photographique a une épaisseur de 1,8 mm, on prendra 1,5 comme indice moyen du verre, et l'on supposera les rayons peu inclinés sur l'axe. (*Grenoble*, 1909.)

33. Un rayon lumineux homogène tombe normalement sur un écran en un point A. On place alors sur son trajet une lame de verre à faces parallèles inclinée sur lui à 45°. Ce rayon frappe maintenant l'écran en un point B. Trouver la distance AB, sachant que la lame a pour indice $\sqrt{2}$ et pour épaisseur 10 cm. (*Poitiers*, 1901.)

34. Calculer le déplacement latéral que subit un rayon traversant sous l'incidence i une lame à faces parallèles d'indice n et d'épaisseur e.

Application : $e = 10$ cm, $i = 45°$, $n = 1,5$.

35. Un tube cylindrique de verre a son axe vertical. Un rayon lumineux horizontal pénètre dans ce cylindre sous une incidence i, se réfléchit partiellement en H, et revient dans l'air suivant KR (*fig*. 9). Quelle doit être la valeur de l'angle d'incidence i pour que le rayon emergent soit parallèle au rayon incident?

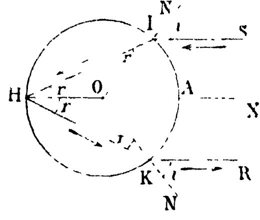


Fig. 9

36. Un rayon incident SI rencontre une face d'un prisme d'angle A; une portion se réfléchit en IR; le reste traverse le prisme dans la position du minimum de déviation et émerge en I'R'. Trouver l'angle x que fait I'R' avec IR.

37. Un rayon de lumière monochromatique jaune tombe sur un prisme avec l'incidence qui répond à la déviation minimum : calculer l'indice de réfraction de ce prisme sachant que son angle est de 60° 12′ 18″ et que la déviation minimum observée est de 20° 14′ 22″. (*Chambéry*, 1909.)

38. Un prisme formé d'une certaine substance, dont l'angle réfringent est $A = 60°$, est disposé dans l'air. On demande de calculer d'abord son indice

de réfraction, par rapport à l'air, sachant qu'un rayon qui tombe sur ce prisme sous l'angle d'incidence de 45° en sort en faisant un angle d'émergence de 45°. Ayant calculé cet indice, on cherchera quel doit être l'angle d'incidence d'un rayon pour que son angle d'émergence soit de 90°

(*Dijon*, 1896).

39. Sur un prisme dont l'angle au sommet est de 60°, on fait tomber un rayon lumineux situé dans la section droite. L'angle d'incidence peut être modifié à volonté.

On demande :

1° De calculer sa valeur pour que la déviation soit minimum ;

2° La valeur de celle-ci.

L'indice de réfraction du verre qui constitue le prisme est égal à $\sqrt{2}$.

(*Dijon*, 1909.)

40. Un prisme de verre a sa première face en contact avec de l'air et sa deuxième avec de l'eau, les indices par rapport à l'air sont, pour le verre 3/2 et pour l'eau 4/3.

On demande :

1° D'étudier la marche d'un rayon situé dans une section principale de ce prisme;

2° De calculer les déviations des deux rayons qui font avec la normale à la face d'entrée des angles d'incidence égaux à 3 degrés et de tracer les trajets suivis par ces rayons en supposant l'angle A du prisme égal à 4 degrés et confondant le sinus d'un petit angle avec l'arc trigonométrique correspondant;

3° De rechercher les rayons capables de traverser le prisme et d'examiner l'influence de l'angle A.

(*Paris*. 1909.)

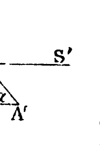


Fig 10

41 Le trapèze ACC'A' (*fig*. 10) représente la section droite de trois prismes. Les deux extrêmes sont en crown d'indice n, ils ont le même angle α en A et en A' et la base ABA' commune. Le prisme du milieu est isocèle : il est en flint d'indice p ; l'angle $CBC' = 2\beta$. Quelle relation doit-il y avoir entre α et β pour qu'un rayon incident SI, parallèle à AA', sorte du dernier prisme sans déviation ?

Cas particulier, $\alpha = 60°$, $n = \frac{3}{2}$, $p = \frac{7}{4}$

42. Un faisceau parallèle de lumière *blanche*, situé dans la section droite d'un prisme triangulaire ABC, tombe sur la face CA de ce prisme et se réfracte ; les rayons provenant de cette réfraction se réfléchissent *intérieurement* sur la face suivante AB, puis tombent intérieurement sur la troisième face BC, d'où ils sortent en se réfractant.

Pour que les rayons colorés qui émergent ainsi de la troisième face soient parallèles entre eux, il faut et il suffit que les angles A et B de la section droite ABC soient égaux.

Démontrer cette proposition et montrer qu'alors le faisceau incident, comme le faisceau émergent, sont normaux tous deux à la base du triangle isocèle de la section droite.

(*Toulouse*, 1906.)

43. Un rayon monochromatique, situé dans la section droite d'un prisme d'angle réfringent A, tombe sur la face d'entrée sous l'incidence i : quelle valeur faut-il donner à i pour que le rayon réfracté sorte normalement à la deuxième face du prisme?

Considérer les trois cas particuliers :

$$A = \frac{\pi}{4}, \qquad n = \sqrt{2},$$

$$A = \frac{\pi}{6}, \qquad n = \sqrt{3},$$

$$A = \frac{\pi}{6}, \qquad n = 2.$$

(*Toulouse*, 1906.)

44. Sur une des faces latérales, AB (*fig.* 11), d'un prisme rectangle isocèle de verre, tombe normalement un faisceau SI de lumière blanche. Ce faisceau rencontre la face hypoténuse en H, sous un angle de 45°. On demande ce qu'il devient alors. L'indice de réfraction moyen du verre dont est fait le prisme pour les rayons rouges est 1,410. L'indice de refraction moyen du même verre pour les rayons bleus est 1,420. (*Marseille*, 1906.)

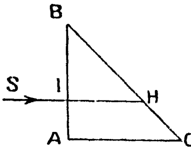


Fig 11

45. Un prisme de verre a pour section droite un triangle équilatéral ABC Dans cette section et parallèlement à BC arrive sur la face AB un rayon lumineux SI qui, après avoir pénetré dans le prisme et s'être réfléchi sur la face BC, sort du prisme à travers AC, dans la direction I'R. Démontrer que I'R est parallèle à SI.

Admettant que SI est un rayon homogène d'indice n, trouver la somme des distances h et h' auxquelles se trouvent de la base $BC = a$ les rayons SI et I'R.

La hauteur h du rayon incident SI au-dessus de la base peut-elle être quelconque?

Application numérique : $a = 12$ cm, $n = \frac{3}{2}$. Calculer à $\frac{1}{10}$ de mm près.

(*Poitiers*, 1906.)

46. On prend un bloc d'une substance transparente, d'indice $n = \sqrt{\frac{3}{2}}$, ayant la forme d'un parallélépipède rectangle. On y creuse une cavité limitée par deux surfaces planes BC et CD (*fig.* 12) faisant entre elles un angle de 120°; la première face, BC, est inclinée à 45° sur le plan horizontal AE On fait tomber normalement à la face AB un rayon lumineux homogène SI, et l'on demande :

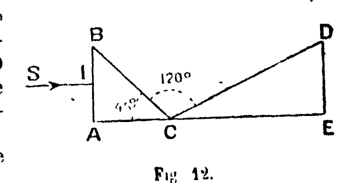


Fig 12.

1° La marche du rayon ;

2° De prouver que le rayon en tombant sur CE, après réfraction à travers CD, subira sur CE la reflexion totale. (*Marseille*, 1906.)

V. — Réfraction. — Lentilles.

47. On photographie un monument sur lequel se trouve une inscription dont les lettres ont 9,5 cm de haut. L'appareil dont on se sert a un objectif de 19 cm de distance focale, et il est situé a 380 cm du monument. Dire quelle sera la dimension des lettres sur la glace dépolie.

On regarde ensuite l'image de ces lettres avec une loupe de distance focale 6 cm. Trouver la grandeur de l'image obtenue en supposant que la distance minimum de la vision distincte soit 24 cm.

48. On veut photographier avec un objectif, dont la distance focale est 30 cm, un tableau dont la surface est 2 m². On veut que l'image photographique de ce tableau occupe une surface de 100 cm².

A quelle distance du tableau faut-il placer l'objectif quand l'image est bien au point sur la plaque de verre dépoli ?

Quelle est la distance de cette glace au centre optique de l'objectif?

49. Avec une lentille convergente, on projette d'un objet une image *réelle* sur un ecran ; en mesurant les hauteurs de l'image et de l'objet, on calcule le grandissement G. Sans toucher à la lentille, on déplace l'objet d'une longueur mesurée l, de façon que l'image soit toujours réelle, et l'on dispose l'ecran de façon que l'image y soit au point; en mesurant sa hauteur, on calcule le nouveau grandissement G'. — Calculer la distance focale f de la lentille, en fonction de G, G' et l

Application numérique : $G = \frac{1}{2}$, $G' = 2$. $l = 18$ cm. Avec ces valeurs, calculer aussi la converg nce de la lentille en dioptries.

50. Une lentille de distance focale égale à 20 cm est placée au-dessus d'un vase cylindrique de manière que son axe soit vertical et rencontre le fond en un point A dont l'image réelle est A'. — AA' = 80 cm.

On verse de l'eau dans le vase a la hauteur $e = 30$ cm.

L'image réelle de A se fait alors au-dessus de A', en A'' et A'A'' = 12 cm. Calculer l'indice de l'eau (La lentille est diaphragmee.)

51. Devant une lentille convergente, de distance focale f, on place un point lumineux, sur l'axe principal, à une distance p de la lentille Entre le point lumineux et la lentille on interpose une lame de verre à faces paralleles d'indice n et d'epaisseur e. On demande où se fera l'image du point lumineux.

Application : $f = 0{,}50$ m, $p = 55$ cm, $n = 1{,}5$, $e = 50$ cm. Dans les calculs, on supposera les angles assez petits pour qu'on puisse confondre leurs tangentes avec leurs sinus (*Nancy*, 1902.)

52. Une voiture automobile se déplace perpendiculairement à l'axe d'un objectif photographique. Quelle doit être la limite supérieure de la pose pour que l'image soit nette ? On admettra que l'image est suffisamment nette si, pendant la pose, l'image d'un point n'a subi qu'un deplacement inférieur à 1/10 de mm.

Vitesse de la voiture = 27 km à l'heure.

Distance de la voiture à l'appareil = 120 m.

Distance focale de l'objectif = 15 cm.

53 Devant une lentille convergente L de foyer f (fig. 13) et à une distance a on place une source lumineuse S. Les rayons réfractés par la lentille viennent produire sur une certaine plage M d'un écran E placé à une distance b de cette lentille un certain éclairement e. A quelle distance x de l'autre côté de l'écran faudrait-il placer une source S′ de même intensité que S pour que l'éclairement produit en M fût égal à e ? On négligera les pertes de lumière produites par la lentille. (*Poitiers*, 1902.)

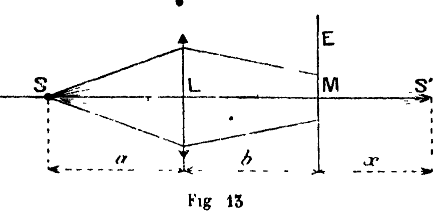


Fig 13

54. Étant donné un photomètre et deux sources lumineuses, A et B, situées à la même distance de l'écran du photomètre, on a interposé entre l'une d'elles, B, et l'écran une lentille divergente dont l'axe optique se confond avec la droite qui joint la source à la région observée de l'écran. De cette manière, l'une des moitiés de l'écran est éclairée directement par A et l'autre par le faisceau issu de B qui a traversé la lentille. Cette dernière a une distance focale de 25 cm et est à 50 cm de la source. Dans ces conditions on constate l'égalité d'éclairement des deux moitiés de l'écran. On demande quel est le rapport des intensités des deux sources.

55. A une distance de x cm de part et d'autre du foyer principal-objet d'une lentille convergente de P dioptries et sur son axe principal, on suppose placés deux points lumineux. Trouver la distance y qui sépare les images. — Construire la courbe $y = f(x)$. (*Poitiers*, 1908.)

56 Comment placer par rapport à une lentille convergente de 4/3 de dioptrie un objet et un écran rectangulaires tous les deux, et perpendiculaires à l'axe de la lentille, pour que l'image de l'objet recouvre exactement l'écran ? Dimensions de l'objet 3×4 cm ; dimensions de l'image 18×24 cm.

57. Devant une lentille convergente dont la distance focale est f_1, est placé, à une distance p, un objet AB dont la hauteur, normalement à l'axe de la lentille, est h_1. Entre l'œil et la lentille L_1 est disposée une glace sans tain à faces parallèles dont la normale fait avec l'axe un angle de 45°. Une deuxième lentille, dont la distance focale est f_2, se trouve en L_2 dans une position symétrique de celle de L_1 par rapport à la glace sans tain. En avant de L_2 est un objet semblable à AB, de hauteur h_2. A quelle distance cet objet doit-il être de la lentille pour que son image paraisse coïncider avec celle de AB pour l'œil placé sur l'axe de l'une des lentilles ?

Application numérique :

$$f_1 = 20 \text{ cm}, \qquad f_2 = 15 \text{ cm},$$
$$h_1 = 4 \text{ cm}, \qquad h_2 = 2 \text{ cm},$$
$$p = 1\text{[illegible]} \text{ cm}.$$

(*Clermont*, 190[illegible].)

58. Un objet éclairé est à une distance s d'un tableau blanc, sur lequel on veut projeter son image. En essayant une lentille, on trouve qu'on peut lui donner deux positions pour lesquelles la projection a lieu, et que la distance de ces deux positions est d ; quelle est la distance focale de cette lentille ? (Méthode de Bessel pour la mesure de distances focales.)

59. On accole deux loupes d'épaisseur négligeable et dont les distances focales sont 5 et 7 mm. On demande d'évaluer en dioptries la convergence du système et en minutes l'angle sous lequel l'œil voit une longueur de 1 mm ; l'œil vise à l'infini. (*Besançon*, 1909)

60. Avec un appareil photographique dont l'objectif est une lentille mince d'une convergence de 5 dioptries, on a mis au point sur l'écran en verre dépoli l'image d'un objet situé à une distance de 3 m de l'objectif.

On veut mettre ensuite au point l'image d'un objet situé encore à 3 m de l'objectif mais placé au fond d'une nappe d'eau de 1 m d'épaisseur.

On constate qu'on est obligé de déplacer l'écran en verre dépoli. Dire dans quel sens et de quelle longueur sera ce déplacement.

L'indice de réfraction de l'eau est égal à $\frac{4}{3}$.

L'objet est de petites dimensions et l'on fait son image au centre de l'écran en verre dépoli. (*Besançon*, 1909.)

61 Une lentille convergente de centre optique O donne, d'un objet rectiligne perpendiculaire à son axe principal, une image AB située à la distance OB de la lentille. On mesure $OB = a$. On interpose ensuite entre AB et la lentille convergente une lentille *divergente* de même axe principal et de centre optique I ; on mesure $OI = b$. Si b est convenable, on observe la formation d'une nouvelle image A'B' perpendiculaire à l'axe principal, laquelle est réelle, droite et agrandie. On mesure la distance $IB' = c$ de cette image à la lentille divergente.

Tirer de là la valeur absolue f de la distance focale de la lentille divergente; calculer le grandissement $\frac{A'B'}{AB}$ et préciser les conditions de possibilité de la mesure de f. Enfin, exprimer en dioptries la puissance de la lentille divergente.

Application numérique. $a = 1$ m ; $b = 90$ cm ; $c = 20$ cm.

(*Toulouse*, 1909.)

62. Au contact d'une lentille convergente d'assez grand diamètre et de foyer f, on dispose une lentille convergente de diamètre moindre et de foyer f'. On obtient ainsi deux images d'un même objet linéaire perpendiculaire à l'axe principal commun des deux lentilles. L'une de ces images est formée par les rayons marginaux, l'autre par les rayons centraux.

Conditions pour que les deux images soient toutes deux virtuelles ou toutes deux réelles Dans ce dernier cas, à quelle distance p faut-il placer l'objet pour que l'une des deux images soit n fois plus grande que l'autre ?

Application numérique : $f = 20$ cm, $f' = 21$ cm, $n = 2$.

(*Paris*, 1909.)

63. L'œil d'un observateur est supposé ne voir distinctement que les objets situés devant lui entre 20 et 50 cm.

On se propose de placer devant l'œil une lentille reculant jusqu'à l'infini la distance maximum de la vision distincte.

La lentille doit-elle être convergente ou divergente ?

Quelle est sa puissance en dioptries ?

Quelle est sa distance focale, évaluée en centimètres ?

Si la lentille est symétrique, quels sont les rayons de courbure de ses faces ?

Si l'une des faces est plane, quel est le rayon de courbure de l'autre ?

Quelles sont, pour l'œil armé de cette lentille, les deux limites de la vision distincte?

L'indice du verre par rapport à l'air est $\frac{3}{2}$. (*Lyon*, 1909.)

64. Un œil, que nous supposerons normal ou emmétrope, se trouve posséder une convergence de 50 dioptries. On place devant lui, une distance de 50 cm, un point lumineux dont les rayons, pénétrant par l'ouverture de la pupille, déterminent sur la rétine une tache brillante circulaire. On demande de trouver le diamètre de cette tache dans les deux cas suivants :

1° Lorsque l'œil est en repos, c'est-à-dire ne met pas en jeu son accommodation;

2° Lorsque, par l'effet de cette accommodation, l'œil augmente sa convergence de 4 dioptries. (Figurer, dans ce dernier cas, la marche des rayons.)

On prendra, pour diamètre de la pupille 5 mm et l'on admettra que l'œil agit comme une lentille enchâssée dans cette ouverture (*Poitiers*, 1909.)

65. Un myope a son *punctum remotum* à 50 cm. Quelle est la convergence des verres qu'il doit employer pour voir distinctement à l'infini?

En plaçant devant son œil un verre de convergence 10, ce myope voit distinctement sans accommodation les objets placés au *punctum proximum*. A quelle distance est ce *punctum proximum*?

En vieillissant, ce myope est devenu complètement presbyte. Quels verres doit-il employer pour voir distinctement à 25 cm?

On négligera la distance entre les verres correcteurs et l'œil.

(*Grenoble*, 1908.)

66. Un œil, de centre optique *o* (fig. 14), voit l'image d'un petit objet MP produite par une lentille convergente CL, dont le numéro est 10 dioptries et dont les foyers principaux sont *o* et F. Sachant que la vision est nette seulement lorsque le point M décrit le segment AB, défini par FA = 0,01 m, FB = 0,04 m :

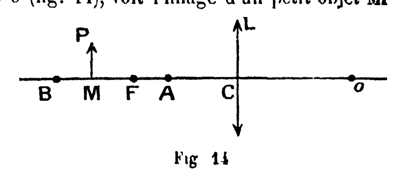


Fig 14

1° On cherchera quelle est la nature de l'anomalie présentée par cet œil;

2° On calculera le numéro du verre qui, appliqué contre l'œil, permettra la vision à l'infini nette sans accommodation;

3° On calculera la distance à laquelle la présence de ce verre amène le *punctum proximum*.

N. B. — On admettra que la distance de la rétine au point O est invariable. (*Alger*, 1908.)

67. Un myope, pour voir nettement les astres, est obligé d'employer un binocle dont les verres ont pour distance focale $f = 25$ cm. On demande à quelle distance au maximum il pourra voir distinctement les objets s'il n'a à sa disposition qu'un binocle dont les verres ont une distance focale de 50 cm. Que gagnera-t-il en pliant ce dernier binocle?

68 Une lentille convergente ($f = 40$ cm) est placée contre un miroir plan perpendiculaire à son axe : montrer que ce système équivaut à un miroir concave dont on calculera le rayon.

Si le miroir plan s'éloigne à une distance d en arrière de la lentille, à quelle distance x faut-il placer un objet devant la lentille pour que le sys-

tème en donne une image dans le plan de l'objet? Rapport des dimensions linéaires de l'image et de l'objet.

On fera successivement $d = 80$ cm et $d = 40$ cm.

69. Association d'une lentille et d'un miroir sphérique de même axe principal. — Un objet lumineux est placé à une distance p d'une lentille de distance focale f. A une distance d derrière cette lentille, se trouve un miroir sphérique de distance focale φ et de même axe principal. La lumière, après avoir traversé la lentille, se réfléchit sur le miroir, puis repasse à travers la lentille et donne une image définitive de l'objet lumineux. Où se forme cette image et quelle en est la grandeur? (*Ajaccio-Bastia*, 1896.)

Cas particulier Le rayon de courbure du miroir est égal à celui de la face de sortie de la lentille; la distance $d = 0$ (lentille argentée sur sa face postérieure, plane ou courbe).

70. Deux lentilles convergentes de distances focales égales à 50 cm sont distantes de 50 cm On veut avec ce système projeter un objet sur un écran de manière que l'image soit 10 fois plus grande que l'objet. Quelles positions faut-il donner a l'objet et à l'écran par rapport au système?

71. A 60 cm d'une lentille convergente L, de 20 cm de foyer, on place un objet AB de 10 cm de hauteur. Calculer la position et la grandeur de son image A'B'.

Derrière la lentille L_1 on en place une autre L_2, plan concave, faite en verre d'indice $\frac{3}{2}$ et dont la face concave a un rayon de courbure de 5 cm. Que devient l'image de AB. 1° quand la lentille L_2 est appliquée immédiatement contre L_1; 2° quand elle est placée à 20 cm au delà de L_1?

72. Deux lentilles convergentes, L et L' ont des distances focales $F = 3$ m et $F' = 5$ cm, elles sont centrées sur le même axe. Des rayons lumineux venant de l'infini traversent d'abord L, puis L', et donnent une image située à 1,95 m en arrière de L. Calculer la distance des deux lentilles. Discussion. (*Alexandrie*, 1909.)

73 On a deux lentilles convergentes L et L' ayant respectivement pour distances focales : $f = 30$ cm, $f' = 20$ cm.

Une droite lumineuse perpendiculaire à l'axe commun des deux lentilles est placée à 50 cm de L.

Construire l'image de cette droite à travers le système des deux lentilles et calculer la distance de cette image à la lentille L' ainsi que le rapport de la longueur de l'image à la longueur de l'objet dans les deux cas suivants

1° Lorsque la distance des deux lentilles est de 45 cm;

2° Lorsque la distance des deux lentilles est de 50 cm.

74. On donne deux lentilles convergentes ayant même axe principal.

La première a une distance focale de 3 cm, la deuxième de 1 cm, et leurs centres optiques O et O' sont à 2 cm l'un de l'autre.

Un rayon parallèle à l'axe traverse l'ensemble des deux lentilles et émerge de façon à passer par un point de l'axe commun des lentilles et qu'on appelle foyer image du système.

1° Trouver les deux foyers correspondant aux deux sens possibles de propagation à travers le système.

2° L'ensemble des deux lentilles peut-il servir de loupe dans les deux sens? (*Lille*, 1909.)

75. Un faisceau de rayons parallèles traverse un prisme dont l'angle réfringent est A; l'indice du prisme est n_A pour la raie A et n_H pour la raie H. Les rayons réfractés sont reçus sur une lentille convergente de distance focale F.

Que le sera la longueur du spectre pur entre les raies A et H ?

On admettra que tous les rayons traversent le prisme dans les conditions du minimum de déviation.

On donne : $A = 60°$, $n_H = 1,531$, $n_A = 1,510$, $F = 1$ m.

(*Clermont*, 1909.)

76. Une lentille convergente de flint a un indice de réfraction de 1,770 pour la raie C du spectre solaire et une puissance de + 10,0 dioptries pour la même radiation.

Sachant qu'elle a un indice de réfraction de 1,799 pour la raie F du spectre solaire, trouver sa distance focale pour cette même radiation.

A cette lentille de flint on associe une lentille divergente de crown ayant respectivement les distances focales 10,0 cm et 9,82 cm pour la raie C et la raie F du spectre solaire. Les deux lentilles minces étant accolées, quelles sont les distances focales du système pour la raie C et pour la raie F?

(*Paris*, 1907.)

77. L'objectif d'un microscope a une distance focale f de 6 mm. L'oculaire de ce microscope a une distance focale f' de 24 mm, l'objet est a une distance a de 6,1 mm de l'objectif

1° A quelle distance de l'objectif se formera l'image de l'objet?

2° Quel est le rapport des dimensions de cette image à celles de l'objet?

3° A quelle distance de cette image faut-il placer l'oculaire pour que la nouvelle image soit a la distance $\Delta = 270$ mm de l'œil?

4° Quel est alors le grossissement de l'oculaire?

5° Quel est, d'après cela, le grossissement total du microscope?

6° Quelle est sa longueur? (*Nancy*, 1909.)

78. L'objectif et l'oculaire d'une lunette astronomique ont des distances focales respectivement égales à 1 m et à 5 cm. On produit a l'aide de cette lunette disposée en conséquence l'image nette d'une planète sur un écran situé à 1,95 m de l'objectif et en arrière de l'oculaire. Quelle est la distance des verres de la lunette? — Expliquer pourquoi il y a plus d'une solution

79 L'axe d'une lunette astronomique dont l'objectif a 2 m de foyer et l'oculaire 2 cm de foyer est dirigé vers le centre du Soleil.

Un observateur dont l'œil normal ne fait aucun effort d'accommodation met au point la lunette sur le Soleil, puis il augmente le tirage de l'oculaire de 1 mm. Trouver la nature, la position et la grandeur de la nouvelle image du Soleil (diam. apparent du Soleil = 32'). Quel est l'intérêt pratique d'un tel dispositif? Une lentille unique pourrait-elle remplir le même rôle? Quel serait sa distance focale?

80. Contre l'objectif d'une lunette astronomique on a appliqué une lentille convergente de diamètre plus faible, de manière que, grâce à cet objectif composé, on puisse voir simultanément au moyen de cette lunette une mire éloignée et un objet placé à une certaine distance d de l'objectif.

On demande quel déplacement il faudra donner à l'oculaire pour voir nettement un objet placé à une autre distance d'.

Application numérique :

Distance focale de l'objectif de la lunette astronomique : $F = 30$ cm; $d = 15$ cm, $d' = 14$ cm. (*Paris*, 1909.)

81. Dans une lunette astronomique dont l'objectif a pour distance focale 1 m, on a réglé le tirage de l'oculaire de manière à voir nettement un objet placé à 11 m en avant de l'objectif. On voudrait utiliser cette lunette pour voir nettement des objets très éloignés, sans avoir à modifier le tirage de l'oculaire. Montrer qu'on peut y arriver en intercalant entre l'objectif et l'oculaire une lentille divergente. Quelle doit être la distance focale de cette lentille pour que ce résultat soit obtenu lorsque la lentille divergente se trouve placée à 0,50 m de l'objectif dans le corps de la lunette? (*Paris*, 1909.)

82. Un œil normal veut observer *sans fatigue* à l'aide d'une lunette un objet placé à distance finie. Quelle doit être la distance L des deux verres, quand l'objet à examiner est à une distance donnée d de l'objectif; on connaît les distances focales F de l'objectif et f de l'oculaire. — Discuter, lorsque d varie de $+\infty$ à zéro. On supposera qu'on peut amener l'oculaire jusqu'au contact de l'objectif, ou au contraire l'en éloigner tant qu'on voudra.

Application : $F = 100$ cm; $f = 2$ cm; $d = 60$ cm.

83. Une lentille convergente donne d'un micromètre divisé en dixièmes de millimètre une image réelle qui est au point sur une échelle divisée en millimètres placée à 4 mètres derrière la lentille; on trouve que 2 divisions de l'image couvrent exactement 98 divisions de l'échelle — Quelle est, en dioptries, la convergence de la lentille?

On utilise cette lentille comme objectif d'une lunette astronomique dont l'oculaire, de 2,5 cm de distance focale, est placé à 10 cm derrière l'objectif, et avec laquelle on vise un astre AB. L'œil étant placée juste au cercle oculaire, calculer à quelle distance il doit accommoder. Calculer aussi quel est le grossissement exact que donne alors la lunette.

84. Deux lentilles convergentes A et B sont disposées de façon que leurs axes principaux coïncident. La distance focale de A est de f cm; celle de B, de F cm. Les centres optiques des deux lentilles sont distants l'un de l'autre de $F + f$. La lentille A fonctionnant comme objectif et B comme oculaire, on demande à quelle distance p de l'objectif doit être situé un objet plan pour que l'instrument en donne une image située dans le plan même de l'objet. Dire si le problème admet toujours une solution. Enfin, en supposant la condition précédente remplie, dire quelle est la position de l'image réelle que donne la lentille A, seule, de l'objet considéré.

Application numérique au cas où $f = 4$ cm et $F = 6$ cm. (*Dijon*, 1902.)

85. Un observateur, dont l'œil est accommodé pour voir à l'infini, observe un objet très éloigné A, à l'aide d'une lunette dont l'objectif et l'oculaire ont respectivement pour distances focales 50 cm et 2 cm.

On couvre ensuite l'objectif de cette lunette avec une lentille divergente de 3 mètres de distance focale, de façon à faire coïncider les axes principaux de ces deux lentilles, que l'on suppose infiniment minces.

On demande de combien et dans quel sens l'observateur devra déplacer l'oculaire pour voir nettement, de nouveau, l'objet lointain A.

Quels seront les deux grossissements successifs obtenus avec cette lunette?

86. Une lunette astronomique est mise au point pour un œil voyant nettement à l'infini. Deux points noirs, distants de 5 cm, sont marqués sur l'ob-

jectif. Celui-ci étant vivement éclairé, on constate que, derrière l'oculaire, il se forme une image réelle des deux points noirs et que les images de ces deux points sont distantes de 1 millimètre.

Quel est le grossissement de cette lunette? (*Paris*, 1896)

87. Dans une lunette astronomique, mise au point pour un œil normal non accommodé, la distance entre les centres optiques de l'objectif et de l'oculaire est de 2 mètres; le grossissement de cette lunette est 24.

On remplace l'oculaire convergent par un oculaire divergent, choisi de telle façon que le grossissement reste le même. La lunette étant au point pour le même œil, on demande quelle est alors la distance des deux verres.

(*Grenoble*, 1909.)

ÉLECTRICITÉ

I. — Électrostatique.

88. **Deux sphères S et et S′ sont chargées d'électricité positive. La première a 2 cm de rayon; elle est au potentiel 4500 volts. La deuxième a** 5 cm de rayon; elle est au potentiel 3200 volts. La distance de ces sphères est de 21 cm (distance des centres) Sur la droite des centres se trouve une balle de sureau chargée négativement, de masse négligeable. A quelle distance des sphères électrisées se trouve-t-elle lorsqu'elle est en equilibre?

Si l'on réunit les deux sphères par un fil fin métallique, la position d'équilibre de la balle de sureau sera-t-elle modifiee?

89. Aux extrémités A et B du diametre d'un cercle de rayon R (fig. 15) se trouvent deux masses électriques positives respectivement égales à a et b. Une masse négative m est assujettie à rester sur la circonférence. En quel point M faudrait-il la placer pour qu'elle fût en équilibre.

Cet équilibre est-il stable?

On prendra comme inconnue la distance $OH = x$ qui sépare du centre O la projection H de M sur le diamètre.

Application : $\frac{a}{b} = 2\sqrt{2}$. (*Poitiers*, 1908.)

Fig. 15.

90. Un conducteur chargé à un potentiel inconnu X est mis en relation avec l'aiguille d'un électromètre à quadrants, dont les quadrants sont à des potentiels égaux et de signes contraires. La déviation lue sur une échelle divisée est de 120 divisions. On supprime la communication, on décharge l'aiguille sans toucher au conducteur et l'on relie de nouveau ce dernier à l'aiguille. La déviation n'est plus que de 40 divisions. Trouver X, sachant que la déviation de l'aiguille, lorsqu'elle est chargée à 1 volt dans ces conditions, est de 5 divisions, et que les potentiels sont proportionnels aux déviations. (*Clermont*, 1897.)

91. On a introduit n fois une petite sphère conductrice de rayon $r = 2$ cm, après l'avoir chaque fois chargee également, dans une sphère creuse de rayon $R = 10$ cm isolée et à l'état neutre, en ayant soin d'établir chaque fois

le contact des deux sphères. On charge une $(n+1)^{me}$ fois la petite sphère et on la met en communication extérieure par un fil long et fin avec la sphère creuse On demande ce qui se passera, et quel sera l'état électrique du système quand l'équilibre sera établi. (*Alger*, 1896).

92 Il faut 7 tours de plateau d'une machine de Wimshurst pour charger une batterie dont la capacité est 0,025 microfarad ; son armature intérieure est au potentiel de 4830 volts, et son armature extérieure communique avec le sol. On demande la charge de la batterie et le travail qu'il a fallu dépenser pour la charger. Sachant que la machine fait 10 tours par seconde, calculer son débit et sa puissance.

93. On a une sphère conductrice de 50 cm de rayon Elle est entourée par une autre sphère conductrice concentrique dont l'épaisseur est extrêmement petite et dont le rayon est 62,5 cm.

Dans une première expérience, on isole la sphère extérieure et l'on fournit à la sphère intérieure une charge de 10^{-7} coulombs. On demande

1° A quels potentiels sont portées les deux sphères,

2° Quelle est l'énergie totale du système ;

3° Ce qui arriverait si l'on mettait les deux sphères en communication par un fil isolé, c'est-à-dire quel serait alors le potentiel du système et son énergie.

Dans une seconde expérience, on met la sphère intérieure au sol et l'on fournit à la sphère extérieure une charge de 10^{-7} coulombs. On demande quelle est alors la distribution électrique sur le système, le potentiel sur la sphère extérieure et l'énergie du système

94 Deux condensateurs sphériques C-D, C'-D' (fig. 16) ont respectivement pour capacités 0,3 et 0,8 microfarad, les armatures D et D' sont au sol, les armatures C et C' respectivement chargées aux potentiels de 15 et 26 volts.

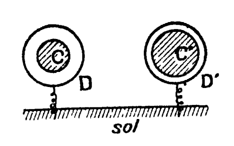


Fig 16

On demande .

1° Les charges de C et C';

2° Comment se modifient ces charges lorsqu'on relie C à C' par un conducteur de capacité négligeable ;

3° Quel potentiel prennent alors C et C'. (*Grenoble*, 1908.)

95. Une bouteille de Leyde a son armature externe au sol et son armature interne au potentiel de 6 000 volts. On relie celle-ci à l'une des armatures d'une boîte de capacité de $\frac{1}{100}$ microfarad, l'autre armature étant au sol. On constate un potentiel d'équilibre de 2 400 volts.

On demande :

1° La capacité électrique C de la bouteille de Leyde,

2° L'énergie électrique qu'elle possédait à l'origine.

II. — Le courant électrique. — Lois d'Ohm. Énergie du courant : Loi de Joule.

96. Un courant se divise en trois branches qui ont pour résistances 1 ohm, 5 ohms, 12 ohms. On demande quelles seront les intensités dans les trois branches, et quelle sera la différence de potentiel à leurs extrémités, sachant que le courant principal est de 10 ampères. (*Lyon*, 1909.)

97. Soit AB (fig. 16) une portion rectiligne d'un conducteur constitué par un fil cylindrique homogène. Sur AB comme diamètre, imaginons une demi-circonférence ACB formée du même fil. Soit maintenant O le milieu de AB et sur OB comme diamètre; imaginons de même une demi-circonférence ODB constituée encore par le même fil que précédemment. Supposons maintenant que par le point A arrive un courant qui traverse toute cette dérivation et sorte par le point B. On demande de trouver le rapport des intensités des courants qui circulent simultanément dans la petite et dans la grande demi-circonférence. (*Poitiers*, 1909.)

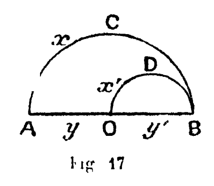


Fig 17

98. Une pile est reliée à un galvanomètre par une résistance négligeable; l'aiguille du galvanomètre dévie de 30 divisions On shunte le galvanomètre de sorte que la résistance du shunt soit $\frac{1}{99}$ de celle du galvanomètre; dans ces conditions, l'aiguille n'est plus déviée que de trois divisions. En admettant que la déviation de l'aiguille soit proportionnelle à l'intensite du courant qui passe dans le galvanomètre, calculer la résistance intérieure de la pile, sachant que celle du galvanomètre est de 5 ohms. (*Grenoble*, 1908.)

99. On demande de déterminer la résistance intérieure d'une pile en utilisant les observations suivantes :

Fermée sur un circuit ayant une résistance égale à 1,70 ohm, elle a donné naissance à un courant de 0,70 ampère. D'autre part, la différence de potentiel, mesurée aux bornes de cette pile *à circuit ouvert* avec un électromètre, a été trouvée égale à 1,54 volt.

Examiner le cas où, au lieu de mesurer la différence de potentiel aux bornes de la pile à circuit ouvert, on la fait débiter sur des circuits de résistance extérieure $R = 1,70$ ohm et $R' = 2,58$ ohms, les courants correspondants mesurés à l'ampèremètre étant $I = 0,7$ ampère et $I' = 0,5$ ampère.

Déduire de ces lectures la résistance de l'élément. (*Grenoble* 1906.)

100. Entre deux points A et C (*fig* 18), des *courants dérivés* provenant d'un courant principal de 5 ampères circulent dans les branches AMC, AB, BNC, BPC disposées conformément à la figure. Les résistances des dérivations sont respectivement 10 ohms pour AMC, 5 ohms pour AB, $\frac{25}{2}$ ohms pour BNC et $\frac{25}{3}$ ohms pour BPC. On demande .

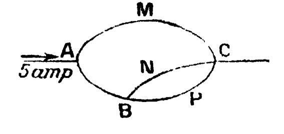


Fig. 18.

1° Les intensités des courants dérivés sur les diverses branches AMC, AB, BNC, BPC ;

2° Les différences de potentiel entre les points A et C, A et B, B et C.

(*Toulouse*, 1909.)

101. On réunit les deux pôles d'une pile par un fil de maillechort de 50 m de long et de 1 mm de diamètre. Il passe dans le fil un courant de 86 milliampères.

Si l'on diminue la longueur du fil de maillechort, le courant augmente. On trouve que, pour doubler le courant, c'est-à-dire pour l'amener à 172 milliampères, il faut réduire la longueur du fil à 17,30 m.

On demande la résistance intérieure de la pile, et sa force électromotrice, sachant que le maillechort est 13 fois moins conducteur que le cuivre, et qu'un fil de cuivre de 1 mm de diamètre et de 100 m de long a une résistance de 2 ohms. (*Clermont*, 1906.)

102. Un ampèremètre a une résistance de 10 ohms, il est gradué pour servir de 0 à 1 ampère.

1° On le shunte en intercalant entre ses bornes des résistances convenables, de façon qu'il puisse servir d'abord de 0 à 5 ampères, puis de 0 à 20 ampères. Quelles sont les résistances nécessaires ?

2° On suppose que ces shunts s'échauffent de 50° pendant le fonctionnement. Calculer l'erreur relative qui en résulte sur l'indication de l'ampèremètre :

a) En supposant le shunt en cuivre dont la résistance croît par degré de $\frac{1}{300}$ de sa valeur à la température ordinaire,

b) En le supposant en maillechort pour lequel l'accroissement n'est que de $\frac{1}{3000}$.

On supposera que la résistance de l'ampèremètre reste invariable.

(*Lille*, 1909.)

103. Un tube de verre exactement cylindrique contient 1359,6 g de mercure à 0°. Sa résistance électrique est de 1 ohm à la température de 0°. Quelles sont la longueur et la section de ce tube ?

Ce tube maintenu à 0° est placé en *s*, en dérivation sur une résistance de 99 ohms dans laquelle un courant entretenait une dépense d'énergie de 1 joule par seconde. On modifie la résistance du circuit principal de façon que l'intensité dans ce circuit revienne à sa valeur primitive. Quelle sera alors la quantité d'énergie consommée par seconde dans la colonne de mercure ?

Densité du mercure à 0° = 13,596.

On considérera l'ohm comme représenté par une colonne cylindrique de mercure à 0° ayant 106 cm³ de longueur et contenant 14,4521 g de mercure. (*Paris*, 1907.)

Fig. 19

104. Le circuit d'un élément Daniell, dont la force électromotrice est 1 volt, comprend une résistance R = 99 ohms, et, entre deux points A et B (*fig.* 19), une dérivation composée d'un galvanomètre de résistance g et d'un fil de résistance s, la résistance totale entre A et B est égale à 1 ohm. Toutes les résistances du circuit autres que R, g et s sont négligeables. Sachant

que le galvanomètre est parcouru par un courant dont l'intensité est $\frac{1}{2} \times 10^{-4}$ ampères, déterminer les valeurs en ohms des résistances g et s.

(*Bordeaux*, 1906.)

105. Une pile a une force électromotrice de 1,35 volt et une résistance intérieure de 1,25 ohm. On reunit les deux pôles par un fil de cuivre d'une résistance de 2,5 ohms.

On demande quelle est la différence de potentiel aux deux pôles de la pile. (*Grenoble*, 1909.)

106. Dans le circuit figuré ci-contre (*fig.* 20) se trouvent deux éléments de pile : P_1 sur AD et P_2 sur BE ; les forces électromotrices de P_1 et P_2 sont e_1 et e_2 ; leurs résistances intérieures, r_1 et r_2. Les portions AB et BC ont des résistances R_1 et R_2 ; la resistance du reste du circuit est négligeable.

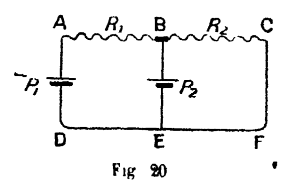


Fig 20

1° Peut-il se faire qu'il n'y ait pas de courant dans la branche BE ? S'il en est ainsi, quelle relation y a-t-il entre les forces électromotrices et les résistances données ?

2° Dans une première expérience, on a constaté que le courant est nul en BE pour $R_1 = 49$ ohms et $R_2 = 101$ ohms. Dans une deuxième expérience, avec les mêmes piles, le courant est nul en BE pour les valeurs 39 ohms et 31 ohms des résistances AB et BC. Déduire de ces données la valeur numerique de la résistance intérieure r_1 de la pile P_1.

107. Un courant I est bifurqué entre les deux points A et B ; dans les deux branches, AMB, ANB (*fig.* 21), sont intercalées des résistances a, b, c, d ; de plus, entre les deux points M et N, on a placé une résistance e.

Calculer la résistance du fil unique qui serait équivalente au systeme a, b, c, d, e.

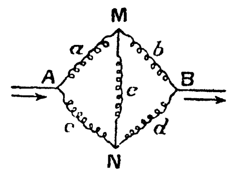


Fig. 21.

108 Deux piles P et P' (*fig.* 22) formées, la première P de *cinq* éléments (il n'y en a que quatre d'indiqués sur la figure), la seconde P' de *quatre* éléments identiques, sont reliées à un circuit ABCDEF, comme l'indique la figure. En G se trouve un galvanomètre et en R un rhéostat. On manœuvre ce dernier de façon que le galvanomètre soit au zéro. On trouve que la résistance R est de 1 ohm.

Déduire de cette expérience la résistance de l'un des éléments de pile employés.

On considérera comme négligeable la résistance de tous les fils de liaison des appareils.

(*Nancy*, 1902.)

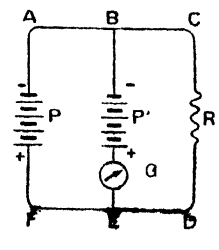


Fig 22.

109 Une pile P (*fig.* 23) envoie un courant dans un circuit comprenant

une résistance R et un ampèremètre A qui marque une intensité de 48 milliampères. Si l'on met en dérivation sur la résistance R un voltmètre V dont la résistance propre est de 250 ohms, il indique une différence de potentiel égale à 0,9 volt et l'intensité marquée par l'ampèremètre A monte à 450 milliampères. Quelle est la résistance du rhéostat R et celle du reste du circuit?

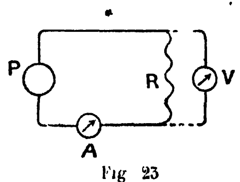


Fig 23

(*Grenoble*, 1909.)

110. Dans le circuit d'une pile de force électromotrice E, on intercale en série deux boîtes de résistances identiques B_1 et B_2 (*fig.* 24); ces deux boîtes sont reliées entre elles ainsi qu'aux bornes de la pile E par des conducteurs de résistance négligeable.

1° Dans une première expérience, toutes les clefs de la boîte B_1 sont placées dans les trous correspondants tandis que toutes les clefs de la boîte B_2 sont enlevées On demande quelle est la différence de potentiel qui existe entre les bornes a_1 et b_1 de la boîte B_1.

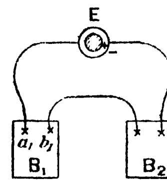


Fig 24.

2° Dans une seconde expérience, on enlève un certain nombre de clefs de la boîte B_1, on les transporte sur la boîte B_2 de manière qu'elles occupent exactement la place qu'elles avaient sur la boîte B_1. Soient R la résistance totale que peut introduire une seule des boîtes dans le circuit de la pile, R_1 la résistance introduite entre a_1 et b_1 dans la seconde expérience.

Quelle est la différence de potentiel existant entre a_1 et b_1 dans la seconde expérience?

Exemple numérique .

$E = 1,5$ volt, $R = 10\,000$ ohms,
$R_1 = 200$ ohms.

La résistance intérieure de la pile est négligeable. (*Bordeaux*, 1908.)

111. Entre deux points A et B (*fig.* 25) on maintient une différence de potentiel V, ces deux points sont réunis par une partie simple AC + BD, dont la résistance totale est R, et une partie formée de deux branches parallèles comprenant chacune une lampe l, dont la résistance est r.

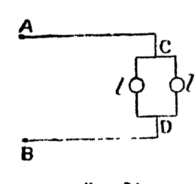


Fig 25

Calculer .

1° L'intensité du courant qui traverse chacune des lampes;

2° L'intensité totale fournie par la source;

3° L'énergie mise en jeu dans le circuit entre A et B, exprimée en hectowatts-heure pendant h heures.

$V = 120$ volts, $r = 215$ ohms,
$R = 5$ ohms, $h = 12$ heures.

(*Clermont*, 1909.)

112. Dans un laboratoire, on prend sur deux bornes A, B le courant continu d'une usine pour actionner un moteur.

1° Le moteur étant immobile, on lit 160 volts et 10 ampères sur les appa-

reils de mesure. Quelle est la résistance totale du moteur et des fils de jonction?

2° On met le moteur en travail et on lit sur l'amperemetre 4 ampères. Quelle est en watts la puissance développée dans le moteur ?

(*Montpellier*, 1906.)

113 On a disposé en dérivation 40 lampes à incandescence de 200 ohms de résistance à chaud dans le circuit extérieur d'une dynamo. Celle ci absorbe une puissance de 5,6 kilowatts; elle a un rendement électrique de 60 0/0 et une résistance extérieure de 2 ohms. En négligeant la résistance des fils conducteurs, calculer l'énergie absorbée par une lampe, et l'intensité du courant qui la traverse.

114. Une lampe à incandescence de 16 bougies consomme une puissance électrique de 3 watts par bougie. Elle est alimentée par une distribution à 110 volts, c'est-à-dire que la différence de potentiel aux deux bornes = 110 volts On demande

1° L'intensité du courant qui traverse le filament;

2° La résistance de ce filament;

3° Combien coûterait par heure une installation electrique comportant 20 lampes de 16 bougies chacune brûlant simultanément.

L'énergie électrique est vendue au prix de 6 centimes l'hectowatt-heure.

(*Besançon*, 1902.)

115 Trois lampes à incandescence, identiques, placées en dérivation sur un circuit d'éclairage, ont été allumées pendant 5 heures; la dépense s'est élevée à 66 centimes Sachant que l'hectowatt-heure coûte 8 centimes et que la résistance de chaque lampe est à chaud de 220 ohms, dire :

1° Quelle est l'intensité du courant traversant chaque lampe;

2° Quelle est la différence de potentiel aux bornes de la source de courant.

On supposera negligeable la résistance des conducteurs.

(*Chambéry*, 1909.)

116 Une dynamo alimente 60 lampes à incandescence dont chacune a une résistance de 200 ohms, et consomme un courant de 0,5 ampère. Les lampes sont en séries de 3, le fil conducteur qui joint les pôles de la dynamo aux lampes a une résistance de 5 ohms; si la résistance de la dynamo est de 2 ohms, calculer quelle doit être sa force électromotrice.

117. Un moteur électrique est alimenté à une tension de 100 volts (voltage entre bornes); il fournit une puissance de 20 chevaux avec un rendement de 0,98.

Calculer :

1° L'intensité du courant; 2° La force contre-électromotrice du moteur; 3° Sa resistance, 4° La chaleur de Joule qui y est dégagée par seconde.

118. Un courant, dans un fil d'une résistance égale à 2 ohms, dégage 600 000 calories-grammes par minute. On demande : 1° l'intensité du courant; 2° la différence de potentiel entre les extrémités du fil; 3° la puissance necessaire pour entretenir le courant dans le fil. (*Nancy*, 1909).

119. Pour chauffer une salle, il faut 10^6 calories par heure. On veut produire cette quantité de chaleur par un courant électrique; on dispose d'un voltage de 110 volts. On demande : 1° l'intensité du courant; 2° le prix de revient de ce chauffage par jour de 12 heures, si le kilowatt-heure coûte 75 centimes

120. On a deux calorimètres C et C′ identiques, pesant l'un et l'autre 40 grammes et faits avec du laiton dont la chaleur spécifique est 0,09.

Le calorimètre C contient 101,4 g d'eau, et C′ contient 86,4 g de térébenthine.

Dans l'eau de C, plonge une spirale construite avec un fil de platine de longueur l, de section s; dans la térébenthine plonge une autre spirale également en platine, mais construite avec un fil ayant une longueur double et une section quatre fois plus grande que le premier.

La spirale de C est parcourue par un courant d'une certaine intensité; la spirale de C′ par un courant d'intensité double.

Au bout de dix minutes, la température de l'eau s'est élevée de 4°,35; au bout de cinq minutes, celle de la térébenthine avait augmenté de 11°,7.

On demande quelle est la chaleur spécifique de la térébenthine.

121. Quelle est en ampères l'intensité d'un courant capable de fondre un fil de plomb de 4 mm en diamètre?

(*Appliquer la formule de la note*, page 227.)

122. Un coupe-circuit en plomb est intercalé sur un circuit dans lequel l'intensité ne doit pas dépasser 20 ampères: quel doit être le diamètre du fil de plomb?

123. Pour poser un coupe-circuit fusible, on a le choix entre un fil de fer, un fil de cuivre et un fil de plomb. Quel doit être le rapport des diamètres de ces fils, pour qu'ils répondent également bien au but que l'on se propose?

124. Les pôles d'un accumulateur (force électromotrice 2 volts, résistance intérieure 0,05 ohm) communiquent, par des fils dont la résistance totale est 0,02 ohm, avec les extrémités d'un fil de cuivre de section 0,5 mm et de longueur 1 m. Ce fil est enroulé en hélice et immergé dans un vase contenant de la glace fondante.

On demande de que le masse de glace la chaleur dégagée par le courant déterminera la fusion en une minute.

Résistivité du cuivre en microhms-centimètre, 1,5.

Chaleur de fusion de la glace en calories-grammes, 80.

125. Calculer la quantité de chaleur que débite en une heure un lustre de 20 lampes à incandescence, sachant que ces lampes reçoivent chacune 0,5 ampère sous 110 volts. Quel poids de charbon faudrait-il brûler pour obtenir la même quantité de chaleur?

Il est rappelé que 1 joule équivaut à 0,24 petite calorie, et que la combustion de 1 g de charbon donne en moyenne 8500 petites calories.

(*Chambéry*, 1903.)

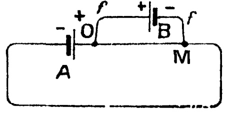


Fig. 26

126. Le circuit d'une pile A (*fig.* 26) de force électromotrice x et de résistance intérieure y est fermé par un fil de l mètres de longueur dont la résistance est de ρ ohms par mètre. Un élément de pile B de force électromotrice e doit être relié d'une part au pôle positif O de A et d'autre part à un point M du premier circuit. On demande 1° Quel pôle de l'élément B il faut relier au pôle positif de A pour qu'il soit possible de trouver un point M tel qu'aucun courant ne passe dans les fils de jonction ff; 2° Ce résultat étant obtenu pour OM $= l'$ mètres, calculer x et y

sachant qu'alors la quantité de chaleur développée par le passage du courant dans la résistance intérieure de A est de q calories par seconde.

Application numérique : $l = 10$ mètres; $\rho = 1$ ohm ; $e = 1$ volt, $l' = 2$ mètres · $q = 1$ calorie; 1 calorie équivaut à 4,17 joules.

(*Paris*, 1907.)

127. Un fil de résistance R forme *pont* sur un circuit qu'il divise en deux parties r, r_1. — Sur la partie r, existe une force électromotrice constante e — Exprimer les quantités de chaleur dégagées isolément dans chacun des conducteurs r, r_1, R ; — en former la somme, et la réduire le plus possible. — Expliquer le résultat très simple auquel on est conduit.

(*Montpellier*, 1902.)

128. La surface de chaque armature d'un condensateur plan est égale à 1 m^2; l'épaisseur de la lame d'air est égale à 1 mm ; l'une des armatures est au sol, l'autre est en communication avec une source au potentiel de 600 volts.

On demande

1° La capacité du condensateur.

2° L'énergie électrique du condensateur

3° La quantité de chaleur que fournit la décharge du condensateur.

On prendra $\pi = 3,14$ (*Besançon*, 1904)

129 On voudrait en 5 minutes échauffer un litre d'eau de 15° à 40° au moyen d'une spirale de fil de platine plongée dans cette eau et parcourue par un courant électrique La différence de potentiel aux deux extrémités de la spirale est de 110 volts

1° Quelle doit être la résistance de cette spirale? On admet que les parois du vase contenant de l'eau ne donnent lieu à aucune perte de chaleur par rayonnement.

2° Quelle est en coulombs la quantité totale d'électricité qui a traversé la spirale de fil?

Remarque. — On sait que 1 joule équivaut à 0,24 petite calorie.

(*Bordeaux*, 1909.)

130. Un conducteur se divise en un point A (*fig.* 27) en deux branches qui se réunissent en B.

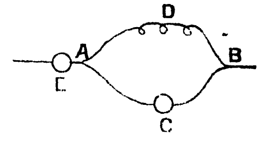


Fig 27

1° Un ampèremetre E placé dans le circuit unique marque 6 ampères et l'ampèremètre C placé dans la branche ACB marque 1 ampère.

2° On ajoute à la résistance ACB une résistance supplémentaire de 0 4 ohm ; alors l'ampèremètre C marque 0,9 ampère, et l'ampèremètre E marque 6 ampères.

On demande ·

1° La valeur de la résistance ADB,

2° La quantité de chaleur dégagée dans la résistance ADB pendant la durée de la première expérience qui est de 6 minutes 57 sec. On prendra 4.17 joules par calorie-gramme pour l'équivalent mécanique de la chaleur.

(*Lille*, 1906.)

131. Une batterie d'accumulateurs E (*fig.* 28) de 400 volts fournit un courant dans un circuit EACB de résistance R, y compris celle de la batterie. Une partie ACB du circuit de résistance x, étant enfermée dans un

calorimètre, on observe par seconde un dégagement de chaleur de 80 calories-gramme. — On met ensuite en dérivation entre A et B une résistance ACB égale à x et l'on constate que la quantité de chaleur dégagée en une seconde par les deux résistances ACB et ADB égale 90 calories-gramme.

Déduire les résistances R et x (*Rennes*, 1909.)

Fig. 28

132. On veut transporter 500 kilowatts à une distance de 10 kilomètres, avec fil d'aller et retour.

La force électromotrice est 125 volts et la puissance perdue par l'effet Joule de 15 pour 100.

Quelle doit être la section du fil de cuivre en millimètres carrés?

La résistance d'un fil de cuivre de 1 m de longueur et de 1 mm² de section est 0,018 ohm (*Montpellier*, 1909.)

133 20 éléments de pile associés en série sont placés en circuit avec un galvanomètre de résistance 8 ohms et une résistance variable dont la résistance actuelle est 8 ohms. — Le galvanomètre indique alors une intensité de 1 ampère

On forme un nouveau circuit en disposant les 20 éléments de pile en deux séries parallèles de 10 éléments chacune et réunissant ces deux séries en surface Dans ce nouveau circuit se trouve le galvanomètre précédent et la résistance variable dont la valeur est portée à 23 ohms.

Dans ces nouvelles conditions, le galvanomètre indique une intensité de 0,5 ampères.

On demande

1° La force électromotrice et la résistance d'un élément de pile (les 20 éléments sont supposés identiques);

2° Le rapport des quantités de chaleur dégagées pendant un même temps dans le galvanomètre, dans les deux cas envisagés. (*Paris*, 1908.)

III. — Électrolyse. — Lois de Faraday.

134. On veut dorer par la galvanoplastie un objet dont la surface est de 32 cm² de façon que la couche d'or déposée ait une épaisseur de 0,1 mm.

Le courant qui traverse la cuve galvanoplastique a une intensité de 15 ampères.

Combien de temps devra durer le passage du courant?

Le poids atomique de l'or est 196; sa densité est 19,32.

(*Grenoble*, 1908.)

135. On dispose dans le circuit d'une pile un galvanomètre et un voltamètre à azotate d'argent. Le courant passe pendant un temps t égal à 5 minutes et dépose $p = 1{,}3416$ g d'argent; la déviation du galvanomètre est $\alpha = 4^0$. On augmente la résistance du circuit de manière à réduire la déviation à $\alpha = 3^0$; la quantité d'argent déposée en 5 minutes n'est plus que $p' = 1{,}0062$ g.

Sachant que la masse d'argent déposée par 1 coulomb est égale à 0,001118 g, on demande de calculer:

1° Les intensités i et i' des deux courants utilisés;

2° La relation $i = f(\alpha)$ entre l'intensité et la déviation du galvanomètre dans les limites de ces expériences.

136. Entre les armatures d'un condensateur dont la capacité est un microfarad, on établit une différence de potentiel de 110 volts

1° Quelle est l'énergie électrique du condensateur ?

2° Quelle quantité de chaleur peut dégager la décharge de ce condensateur ?

3° Quelle masse d'argent cette décharge peut-elle mettr en liberté dans un sel d'argent ? (*Montpellier*, 1909.)

137. Un condensateur de 10 microfarads, chargé, peut à la décharge fournir 10000 microcoulombs.

On demande :

1° Quelle est la différence de potentiel existant entre ses deux armatures ;

2° Pendant combien de temps on pourrait avec la décharge alimenter un courant de 1 micro-ampère ;

3° Combien de fois il faudra décharger ce condensateur, chargé comme il a été dit, à travers un voltamètre à eau pour mettre en liberté 9 mmg de gaz tonnant, sachant qu'il faut 96600 coulombs pour mettre en liberté un équivalent électrochimique d'un élément quelconque et que l'équivalent électrochimique de l'hydrogène est 1. (*Lyon*, 1909.)

138. Avec deux piles Bunsen associées en quantité on dépose sur des objets plongés dans un bain galvanoplastique 6,30 g de cuivre en 50 minutes. La résistance intérieure de chaque pile est 0,10 ohm et la force électromotrice 1,90 volt. On sait aussi que 96600 coulombs mettent en liberté 1 équivalent-gramme, soit 31,75 g de cuivre.

Quelle était la résistance du bain galvanoplastique ? (*Grenoble*, 1909.)

139. Le circuit extérieur d'un générateur électrique dont la force électromotrice est 31,5 volts et la résistance intérieure 1 ohm comprend :

1° Une résistance de 1 ohm plongée dans un calorimètre contenant 100 g d'eau dont la température s'élève de 1°,29 par minute ;

2° Un bain de sulfate de cuivre dans lequel plongent deux électrodes inattaquables. La résistance de ce bain est de 8 ohms.

On demande :

a) L'intensité du courant ;

b) Le poids de cuivre déposé par minute, sachant que le poids atomique du cuivre est 63 ;

c) La force contre-électromotrice de la cuve électrolytique.

Si l'on remplaçait les électrodes inattaquables, par des électrodes en cuivre de mêmes dimensions, l'intensité conserverait-elle la même valeur ?

S'il y a variation de l'intensité en indiquer le sens et la cause.

On néglige la résistance des conducteurs faisant communiquer entre eux l'électromoteur, le bain et la résistance plongée dans le calorimètre.

(*Caen*, 1909.)

140. Par deux fils de résistance négligeable, on relie les pôles d'une pile de force électromotrice e à deux points d'un circuit de résistance totale R comprenant une pile de force électromotrice E, on désignera par x la résistance de la portion du circuit extérieur comprise entre les deux points d'attache.

1° On demande à quelles conditions il est possible d'obtenir que la pile de force électromotrice e ne soit traversée par aucun courant ;

2° Ce résultat étant supposé réalisé, on substitue à la pile de force électromotrice e une résistance R. Quelle est alors la masse de zinc dissoute en une heure dans la pile qui fournit le courant ?

Application numérique $E = 4$ volts ; $e = 1$ volt, $R = 28$ ohms, Zn = 65. On sait que 96 600 coulombs dégagent 1 g d'hydrogène dans l'électrolyse de l'eau. (*Paris*, 1909.)

141. Les électrodes d'une pile de Volta sont constituées par un manchon cylindrique de zinc amalgamé et par une tige cylindrique de cuivre disposée suivant l'axe du manchon. Celle-ci a été recouverte par grillage d'une couche uniforme d'oxyde cuivrique. La force électromotrice de cette pile est 1,5 volt, la résistance de l'eau acidulée entre les deux électrodes est 0,8 ohm. En fermant son circuit par une résistance d'un ohm, on constate que l'intensité du courant produit est constante pendant 5 minutes 15 secondes, puis qu'elle décroît brusquement. On demande de dire pourquoi il en est ainsi et de déterminer, à 1 mg près, quelle masse d'oxyde recouvrait la tige de cuivre.

Dans les conditions de l'expérience, l'eau acidulée n'attaque pas l'oxyde de cuivre.

Le cuivre divalent a comme masse atomique 63,6 ; l'oxygène, 16.

On rappelle que 96 600 coulombs libèrent une valence-gramme. (*Paris*, 1908.)

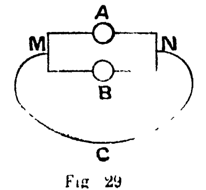


Fig. 29

142. Un circuit électrique est constitué par 24 éléments Daniell disposés en deux séries parallèles A, B (*fig.* 29) de 12 éléments chacune, et un fil conducteur MCN dont la résistance égale 1,48 ohm.

1° Calculer l'intensité du courant dans le fil conducteur ;

2° Calculer le poids de zinc dissous par heure dans chaque élément de pile.

Résistance d'un élément Daniell : 0,12 ohm.

Force électromotrice d'un élément Daniell, 1,1 volt.

Poids atomique du zinc : 65,4.

On rappelle que 96 600 coulombs libèrent 1 g d'hydrogène dans un voltamètre. (*Rennes*, 1909.)

143. Un voltamètre (*fig.* 30) dont les électrodes sont des *lames de zinc* et l'électrolyte du *sulfate de zinc* dissous dans l'eau, est dérivé sur un shunt ; celui-ci, formé d'un alliage dont la résistance ne varie pas sensiblement avec la température, est intercalé dans un circuit parcouru par un courant continu I. Une bobine en fil de cuivre est ajoutée en série au voltamètre pour rendre *l'intensité i du courant dérivé dans celui-ci indépendante de la température ambiante*. Quelles doivent être, à la température T, les résistances R du shunt, ρ du voltamètre, r de la bobine pour obtenir par heure un dépôt P de zinc sur la cathode ?

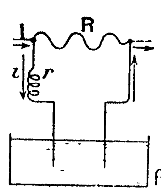


Fig. 30.

L'équivalent électrochimique du zinc est égal à E, la résistance de la solution de sulfate de zinc diminue d'une quantité égale à une fraction m de sa valeur à 0° centigrade quand la température s'élève de 1° centigrade, tandis que celle du cuivre augmente, dans ces conditions, d'une quantité égale à une fraction b de sa valeur à 0° centigrade ; la perte de puissance par effet Joule dans le shunt et son circuit dérivé est égale à W.

Application numérique :
$W = 200$ watts, $E = 0,337$ milligrammes par coulomb,
$I = 100$ ampères,
$T = 10°$ centigrades, $m = 0,015$,
$P = 2,4264$ grammes, $b = 0,004$. (*Bordeaux*, 1901.)

144 Une pile de 10 éléments identiques montés en série donne dans un premier circuit un courant dont l'intensité est de 0,75 ampères. On ajoute dans le circuit une résistance supplémentaire de 5 ohms et le courant n'a plus alors qu'une intensité de 0,60 ampères. On demande de calculer d'après cela :

1° La résistance du circuit primitif, en y comprenant celle de la pile;

2° La force électromotrice de chacun des éléments employés.

(*Dijon*, 1902.)

145. On a mis 5 heures à recharger, au régime de 6 ampères, une batterie d'accumulateurs de 75 éléments montés en série.

On utilise ensuite l'énergie ainsi emmagasinée en groupant les éléments en 3 séries de 25, montées en dérivation, pour alimenter un arc de 30 ampères. Chercher :

1° Quelle est, en joules, la valeur de l'énergie emmagasinée, sachant que la force électromotrice moyenne d'un élément est de 2 volts, pendant la charge ou la décharge;

2° Quelle est, en watts, la puissance du courant de décharge;

3° Pendant combien de temps il faut laisser passer ce courant pour épuiser l'énergie accumulée, en supposant qu'il n'y a eu aucune perte.

(*Alger*, 1909.)

IV. — Électromagnétisme. — Électro-aimants.

146. Une bobine B porte N spires sur une longueur totale l; le fil est traversé par un courant d'intensité i. L'axe de cette bobine est perpendiculaire au méridien magnétique. A l'intérieur est suspendue une aiguille aimantée, mobile autour d'un axe vertical, dont chacun des pôles a une masse magnétique égale à m unités C. G. S. Quelle est la force exercée par le courant sur chacun des pôles et quelle sera la position d'équilibre de l'aiguille?

Application numérique :
$N = 500$, $i = 0,016$ ampère,
$l = 50$ cm, $H =$ composante horizontale du champ terrestre
$m = 12$, $= 0,2$ gauss. (*Clermont*, 1909.)

147. A un petit aimant NS (*fig.* 31), mobile autour d'un axe vertical, on a collé un petit miroir concave M, de rayon $r = 1$ m.

Dans la position d'équilibre, le centre de ce miroir est en O. On dispose normalement à l'axe OM une règle RR dans laquelle est pratiquée une fente verticale dont le milieu coïncide avec O, et l'on éclaire cette fente.

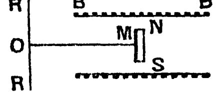


Fig. 31

L'équipage MNS est installé au centre d'une bobine creuse horizontale BB, dont l'axe est perpendiculaire au méridien magnétique. Cette bobine a $n = 10$ spires par centimètre de longueur comptée sur l'axe. On y lance un courant d'un milliampère,

et l'on constate qué l'image réelle de la fente O, due au miroir M, vient une fois l'équilibre établi, se placer sur la règle à 125 mm de sa position primitive O. Déduire de cette expérience la valeur de la composante horizontale H du champ magnetique terrestre.

On aura soin de confondre les angles avec leurs tangentes.

(*Alger*, 1908.)

148. Une bobine d'électro-aimant, portant une seule couche de fil de cuivre de 0,2 cm de diamètre, doit donner une induction magnétique $B = 9000$ gauss. Quel courant faudra-t-il y faire passer? On supposera · 1° que le noyau est en fonte dont la perméabilité $\mu = 70$; 2° que le noyau est en fer doux pour lequel $\mu = 2000$.

149. La bobine d'un électro-aimant a 720 tours de fil et 20 cm de longueur, le noyau à 4 cm de diametre; on alimente cette bobine par un courant de 10 ampères. Calculer le flux d'induction à travers le noyau dans les trois cas suivants :

1° Le noyau est vide ($\mu = 1$); le noyau est en fonte ($\mu = 70$), 3° le noyau est en fer doux ($\mu = 2000$).

150. Un electro-aimant de récepteur Morse a un noyau en fer à cheval de 0,9 cm de diamètre; chaque bobine porte 300 couches de fil de 120 spires chacune; excité par un courant de 0,2 ampère, il a une force portante totale de 3 kg; quelle est la force portante d'un autre électro-aimant dont le noyau de même perméabilite μ a 0,4 cm de diametre, chaque bobine portant 36 couches de fil de 150 spires chacune, et qui est excité par un courant de 0,1 ampere?

151. Quelle est la force électromotrice induite dans une barre horizontale de 3 m de longueur, qui se déplace verticalement parallèlement a elle-même avec une vitesse de 2 m par seconde dans le champ magnetique terrestre?

L'intensité du champ magnétique terrestre est 0,5 gauss, et l'inclinaison magnétique au lieu considéré $I = 60^0$.

152. Les deux pôles d'une pile de 10 éléments Daniell (*fig.* 32) couplés en série (force électromotrice d'un élément = 1,09 volt, résistance intérieure d'un élément = 0,2 ohm) sont réunis par un circuit comprenant une bobine A dont la résistance est égale a 1 ohm et une résistance variable M formée par un microphone, c'est-à-dire par des baguettes de charbon reposant sur des supports de même substance portés par une planchette en sapin.

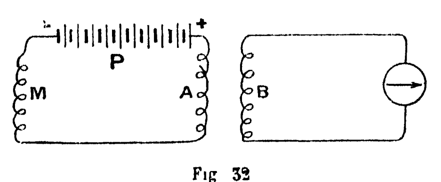


Fig 32

a) A un moment donné, cette résistance variable est égale à 7,9 ohms; quelle est à ce moment l'intensité du courant qui circule dans le circuit?

b) On donne un choc sur la planchette du microphone, la résistance tombe à 6,909 ohms. L'intensite du courant varie, on demande de combien

c) Sur la bobine A on a enroulé une seconde bobine B fermée par un circuit comprenant un galvanometre; on demande ce qui se produit dans ce second circuit au moment du choc sur la planchette du microphone.

(*Besançon*, 1909.)

V. — Machines génératrices et machines réceptrices.

153. Un moteur de résistance R est alimenté par un courant; la différence de potentiel aux bornes est E. Quelle sera l'intensité I pour laquelle la puissance fournie par le moteur est maximum? Quel sera alors le rendement?

154. La réceptrice d'une installation doit pouvoir fournir P kilowats; le fil conducteur que l'on veut employer ne peut supporter plus de I ampères. Quelle est la force contre électromotrice E_2 que cette réceptrice doit avoir? Quelle devra être la force électromotrice F_1 de la génératrice? On donne la résistance totale R du circuit.

Application : P = 100 kw, I = 50 ampères; R = 10 ohms.

155 Une génératrice a une force électromotrice de 300 volts; elle alimente une réceptrice dont la force électromotrice inverse est de 200 volts; les deux machines ont la même résistance 10 ohms, et le câble qui les joint a une résistance de 5 ohms Quelles sont les puissances de la génératrice et de la réceptrice? Quel est le rendement électrique de l'installation?

156. Dans une dynamo montée en série, l'induit a une résistance R, les bobines des inducteurs une résistance R' et le circuit extérieur une résistance fixe R''. Comment varie le rendement, lorsqu'on fait varier le rapport $\frac{R}{R'}$, la somme R + R' restant constante?

157. Dans une dynamo montée en dérivation, la résistance de l'anneau est R = 0,25 ohm, celle de la dérivation qui alimente les inducteurs 1,25 ohm. La différence de potentiel aux balais étant de 120 volts, et l'intensité dans le circuit extérieur 3,5 ampères, déduire de là la force électromotrice de la dynamo.

158. On possède trois machines de Gramme *identiques* G, M, M' ayant chacune 1 ohm de résistance intérieure. Quand on fait tourner l'une d'elles à raison de x tours par seconde, la force électromotrice produite est x volts quelle que soit l'intensité du courant.

On relie ces machines entre elles comme la figure 33 l'indique. Les fils ff' ont chacun pour résistance 0,5 ohm; les résistances des autres fils de connexion sont négligeables. La machine G fonctionne comme générateur; on la fait tourner à raison de 50 tours par seconde. — Les machines M, M' fonctionnent comme moteurs; les nombres de tours qu'elles font par seconde sont respectivement n et n'.

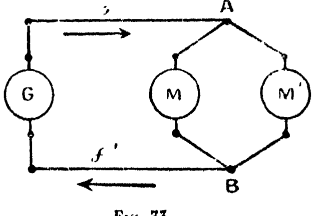


Fig 33.

Calculer l'intensité du courant fourni par la machine G et la différence de potentiel entre les points A et B dans les cas suivants :

1° Les machines M et M' sont calées ($n = n' = 0$);

2° M est calée ($n = 0$), M' est abandonnée à elle-même sans qu'on lui demande de fournir aucun travail;

3° Les deux machines M et M' tournent. On maintient constante et égale à 40 la somme $n + n'$. On fait varier n entre 14 et 26. Étudier en fonction de n les variations de la somme des travaux exécutés par seconde par les moteurs M et M'.

(*Lille*, 1912).